Ben Rabah

الجزء الخامس

الفيزياء الحديثة

« إننى أفكر وأفكر لشهور وسنوات ثم أخرج فى تسع وتسعين مرة بنتيجة خاطئة. وفى المرة المائة أكون مصيباً »

ألبرت أينشتين

عندما أوشك القرن التاسع عشر على الرحيل ، شعر كثير من المراقبين أن الفيزياء قد اكتملت تقريبًا فى ضوء النجاحات التى تحققت فى فهم الكيمياء والنظرية الكهرومغناطيسية والديناميكا الحرارية . . فقد اتضح أن الضوء موجات . . وأن الإلكترون هو أحد مكونات المادة مما أشار إلى أن تركيب الذرات كهرومغناطيسي . وبدا أن الميكانيكا النيوتونية وقانون الجذب العام غير قابلين للمنافسة من حيث قدرتهما على التنبؤ بنتائج التجارب العملية . وظهر الكون التقليدى كما لو كان حتميًا تمامًا ، وأنه يعمل طبقًا لعدد محدود من المبادئ البسيطة كالساعة فى دقتها .

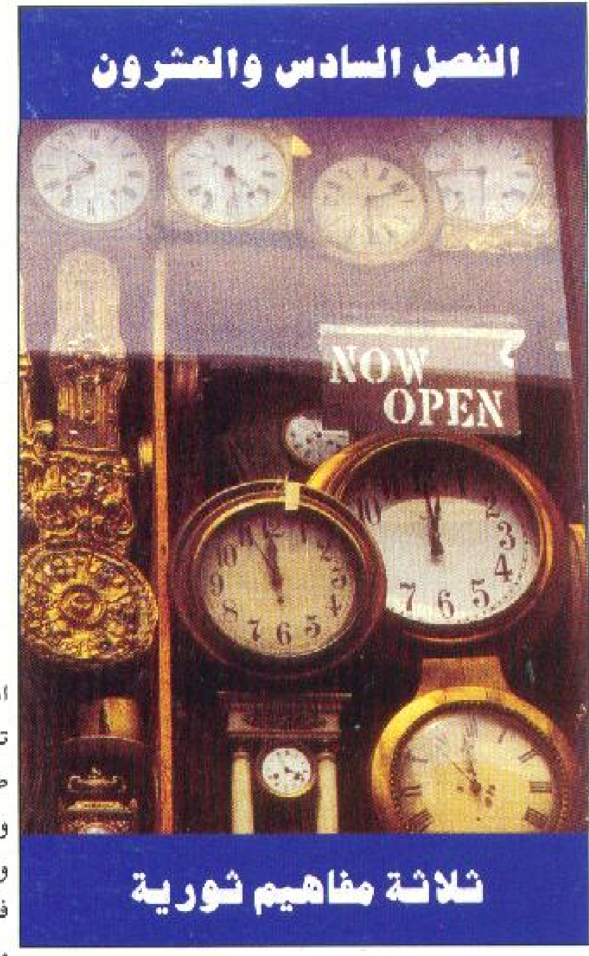
وإذ بدأ القرن العشرون فإن العديد من التجارب العملية الجديدة أفضت إلى نتائج لا تخضع لتفسيرات القوانين الكلاسيكية التى اختبرت من قبل . وقد شملت النتائج اكتشاف الذرة النووية ، والأسلوب الذى يتفاعل به الضوء مع الإلكترونات داخل الفلزات ، واكتشاف أن سرعة الضوء لا تتغير بتغير سرعة الراصد .

وهكذا أصبح من الضرورى حدوث ثورة جذرية فى مفاهيمنا حول ما نعرفه من القوانين الفيزيائية من أجل تفسير جميع المشاهدات الجديدة المحيرة . وضم الإطار المقترح للتفسيرات ، والذى نطلق عليه **الفيزياء الحديثة** ، مركبتين رئيسيتين هما : النظرية النسبية وميكانيكا الكم . . والنظرية النسبية مهمة من أجل تفسير المشاهدات المتعلقة بالأجسام التى تتحرك بسرعات كبيرة (تقترب من سرعة الضوء) . أما ميكانيكا الكم فقد أصبحت قادرة على تفسير تركيب وسلوك الذرات والنوى . وذلك بإثبات أن الجسيمات على مستوى صغير للغاية تسودها خصائص موجية . وأدى هذا إلى أن يستبدل باليقينية الكامنة فى الفيزياء الكلاسيكية ، عدم اليقين المميز للوصف الاحتمالى لتفاعل المادة والضوء على المستوى الذرى .

على أن الفيزياء الكلاسيكية التقليدية لا زالت صالحة بالنسبة لخبراتنا اليومية « العادية » ـ وهذا ما يضفى قيمة على أهمية دراستها . وخلاصة ما حدث هو أننا حين غادرنا عالم الظواهر العادية وانتقلنا إلى فحص الظواهر الدقيقة للغاية أو السريعة للغاية ، فقد كان علينا أن نترك وراءنا التحامل المرتبط بفطرتنا ونفسر الطبيعة بشروطها هى . وقد كان إنجاز هذا المدى العريض من العمل فى فترة قصيرة من التاريخ كالقرن العشرين ، بمثابة فخر ومجد للذكاء والروح البشرية . إلا أن القضية لم تغلق بعد ولعلنا ندرك هذا الآن ، أفضل مما فعلنا منذ قرن مضى .



الفصل السادس والعشرون



ثلاثة مفاهيم ثورية

استقر في أذهان العديد من العلماء أنه بحلول عام 1900 ، قد تمت معظم الاكتشافات العظمى في الفيزياء . ولكي نكون صادقين فإن قليلاً من المشكلات المزعجة قد ظلت بلا حل ، وإن بدا أن كل القوانين الفيزيائية الأساسية تقريبًا قد تم اكتشافها . وقد كان هذا الرأى كما سنرى في هذا الفصل خاطئًا تمامًا . فقد ظلت جوانب شاسعة من السلوك الفيزيائي للطبيعة عندئذ مجهولة تمامًا .

وعندما نطالع تاريخ العلوم ، فإننا نكتشف أن كل تقدم علمى عظيم قد كان مقترنًا باسم شخص واحد فحسب . فمن المعروف أن جاليليو هو رائد فهمنا لكيفية حدوث الحركة الانتقالية للأجسام ، وأن اسم نيوتن قد خلد مع قوانينه الثلاثة للحركة وفى قانون الجاذبية . وكان فاراداى رائدا فى فهم المغناطيسية ، أما ماكسويل فقد وحد الظواهر الكهربية والمغناطيسية من خلال معادلاته الأساسية الأربع . أى أن هذه الأمثلة وغيرها كثير ، دليل على أن الفرد قادر بذكائه على إنارة جوانب ضخمة من العلم لنا جميعًا .

وليس معنى هذا أن هؤلاء الأفراد قد أنجزوا اكتشافاتهم بمعزل عن الآخرين . إن العكس هو الصحيح . فمؤرخو العلوم يبينون بوضوح أن كلاً من هذه الاكتشافات قد جاء تتويجاً لسنوات من عمل الكثير من العلماء الآخرين . فقد كتب نيوتن ذات مرة ، « لو أننى رأيت أبعد من الآخرين ، فذلك لأننى كنت أقف على أكتاف عمالقة » وحتى مع هذه الشهادة فإن أناسًا آخرين وقفوا على أكتاف نفس العمالقة ولكنهم لم يروا شيئًا ! وبينما ينبغى علينا ألا ننسى فضل الأسلاف ، إلا أن عبقرية وبصيرة هؤلاء العلماء العظام

لا يجب أن تبخس وعلينا ألا نعيش مبجلين لأسلافنا العلميين لدرجة أن نقلل من قدرتنا الذاتية .

لقد نبعت الاكتشافات التي سندرسها في هذا الفصل وما يليه من الفصول من مصادر غير متوقعة في أغلب الحالات .

الجزء الأول : نظرية النسبية

26-1 فروض نظرية النسبية

لقد أجريت العديد من التجارب عبر القرون من أجل معرفة قوانين الطبيعة وفي عام 1905 وصل أينشتين إلى الاقتناع بأن المعلومات التجريبية تدفعنا إلى قبول حقيقتين حميدتين في الطبيعة وهما :

1 إن سرعة الضوء في الفراغ كما ثبت من القياسات تظل ثابتة $(c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s})$ بغض النظر عما إذا كان مصدر الضوء هو المتحرك أو من يقوم بالقياس .

2 إن السرعات المطلقة لا يمكن قياسها . والسرعات التي يمكن تعيينها فحسب هي السرعات بالنسبة لأجسام أخرى .

وعندما اقتنع أينشتين بصحة هاتين المقولتين فإنه تمكن من بيان أن الكثير من الجوانب غير المتوقعة للعالم من حولنا لا زالت في طي المجهول . وقد عرف الاستدلال المنطقي له **بالنظرية النسبية*** ، وصارت المقولتان المعبرتان عن حقائق واضحة هما فرضيها الأساسيين .

ومن المستحيل إثبات هذين الفرضين بشكل مباشر ، فهما خلاصة إجماع كل الحقائق التجريبية المعروفة . ونعتقد أنه من الممكن ، وإن كان غير محتمل ، أن تتمكن بعض التجارب في المستقبل من دحض أحدهما . ولكنهما مدعمتان في الوقت الراهن بالعديد من المحاولات الفاشلة لدحضهما . أضف إلى ذلك ، كما سنرى لاحقًا ، أن فروض أينشتين قد أدت إلى نتائج مذهلة حققتها التجارب .

لقد كان الفرض الأول نتيجة لسلسلة من التجارب التي بدأها عام 1887 أ.أ. ميكلسون وزميله أ.و. مورلي بالولايات المتحدة . وقد اعتقد معظم العلماء في ذلك الوقت أن الموجات الضوئية تتذبذب داخل مادة تملأ الفضاء كله . وقد سميت هذه المادة ، التي وصفت قديمًا منذ القرن الرابع قبل الميلاد على يد أرسطو ، **بالأثير** . فمن ناحية كان على هذا الأثير أن يكون رقيقًا جدًا حتى يسمح للكواكب والنجوم أن تسبح عبره بحرية ، ومن ناحية أخرى كان لابد للأثير أن يتمتع بخواص المواد الجاسئة جدًا حتى يحمل الذبذبات المستعرضة للضوء بهذه السرعة الهائلة . ولم يكن من السهل قبول هذه

* سنناقش هنا نظرية النسبية الخاصة لأينشتين . وهي صالحة للتطبيق على أجسام غير معجلة (متسارعة) فقط . وقد قام أينشتين عام 1916 بعمل امتداد لنظريته لتشمل أجسامًا معجلة (متسارعة) وذلك في إطار نظريته العامة .

التناقضات . ولكن العلماء تمسكوا بمبدأ الأثير جزئيًا لأنه وفر مناط إسناد ساكن يمكن قياس الحركة المطلقة فيه .

وقد ظن ميكلسون أن عليه أن يستطيع اكتشاف حركة الأرض عبر الأثير وذلك بمقارنة سرعة الضوء في اتجاه حركة الأرض حول الشمس مع سرعة الضوء في اتجاه مستعرض لهذه الحركة ، باستخدام مقياس للتداخل صممه بنفسه . وينشق الضوء عند دخوله المقياس إلى اتجاهين ، فيذهب جزء من الضوء في اتجاه حركة الأرض ، وينتقل الجزء الآخر في اتجاه متعامد مع حركة الأرض . وقد كان من المفترض أن الأثير يشبه نهرًا يسري عبر الجهاز حاملاً معه الضوء . ومثلما يقتضي الأمر قضاء فترات زمنية مختلفة عندما يقوم قارب برحلة ذهابًا وإيابًا باتجاه النهر ، وعندما يقوم بقطع نفس المسافة عندما يعبر النهر جيئة وذهابًا ، فإن نظرية الأثير تنبأت بأن شعاعي الضوء سيستغرقان فترات زمنية مختلفة لكي يعودا إلى النقطة التي إنشقا عندها . وكان على هذا الاختلاف في الزمن أن يُحدث اختلافًا في الطور بين الشعاعين ، من شأنه أن يشاهد على هيئة هدبات للتداخل عندما يتحد الشعاعان مرة أخرى .

وسرعة الأرض عند تحركها في مدارها حول الشمس تبلغ $10^{-4}c$ تقريبًا ، وهو مقدار يقع في نطاق جهاز التداخل لميكلسون . على أن المحاولات المتكررة لقياس التأثير المتوقع **لم تسفر عن أي ظواهر تداخل على الأطلاق** . وقد استنتج ميكلسون أنه لا يوجد شيء اسمه الأثير يسري عبر الجهاز ، وأن سرعة الضوء هي نفسها في كل من المسارين . وقد تأكدت هذه النتيجة عندما أجريت تجارب أخرى على جانب متزايد من الدقة عبر القرن العشرين كله مما جعل أينشتين يتخذها بمثابة فرضه الأول .

وربما احتاج الفرض الثاني إلى بعض التفسير . نعلم أنه من اليسير قياس السرعات النسبية للأجسام . فعداد السرعة في السيارة يدل على السرعة التي تتحرك بها السيارة بالنسبة للطريق ، ولكن هذه السرعة ليست مطلقة . والكرة الأرضية تتحرك بسبب دورانها حول محورها ودورانها حول الشمس . وحيث أننا نعرف هاتين السرعتين ، فنستطيع إذا أردنا أن نحسب سرعة السيارة بالنسبة للشمس .

وتتحرك الشمس نفسها في مجرتنا ، درب التبانة ، كما أن المجرة في حركة بالنسبة لنجوم أكثر بعدًا . ويبدو أنه ليست هناك طريقة لتعريف سرعة مطلقة محددة لجسم ما ، لأن كل شيء يبدو في حركة . وكل ما نستطيع قوله هو مدى سرعة جسم ما متحرك بالنسبة لجسم آخر .

وهناك طريقة أخرى لعرض الفرض الثاني ، وهي طريقة تعطينا لمحة عن أهميتها الأساسية ، وهي تتم عادة بدلالة مناطات الإسناد . **ومناط الإسناد هو أي نظام للإحداثيات تؤخذ القياسات بالنسبة إليه** . فموضع أريكة أو منضدة أو كرسي مثلاً ، يمكن أن يوصف بالنسبة لجدران حجرة ما . وتصبح هذه الحجرة هي مناط الإسناد المستخدم . أو قد نعتبر ذبابة تقف على نافذة سيارة متحركة . حيث نستطيع وصف موقع الذبابة في السيارة باستخدام السيارة كمناط إسناد . وكمثال آخر نستطيع وصف

موقع سفينة فضاء بالنسبة لمواقع نجوم بعيدة . ويصبح نظام الإحداثيات المبنى على هذه النجوم هو مناط الإسناد .

'2 تكون القوانين الأساسية للطبيعة هي نفسها في جميع مناطات الإسناد التي تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض .

وكثيرًا ما يتم اختزال هذا النص باستخدام مصطلح **مناط الإسناد ذو القصور الذاتي** ومناط الإسناد ذو القصور الذاتي **هو نظام للإحداثيات ينطبق بداخله قانون القصور الذاتي** : يبقى جسم ما في حالة سكون مالم تؤثر عليه قوة غير متعادلة فتكسبه تسارعًا (عجلة) كما تطبق قوانين الطبيعة الأخرى في مثل هذا النظام . ويمكننا ـ بدرجة جيدة من التقريب ـ اعتبار كل النظم المرجعية المتحركة بسرعة ثابتة بالنسبة لنجوم بعيدة بمثابة مناطات ذات قصور ذاتي . وهكذا نجد بين أيدينا نصًا ثالثًا للفرض الثاني :

''2 تكون القوانين الأساسية للطبيعة هي نفسها في جميع مناطات الإسناد ذات القصور الذاتي .

ويمكنك فهم العلاقة بين هاتين الطريقتين المترادفتين للنص على الفرض الثاني إذا أخذنا ما يلي في الاعتبار . عندما نقول أننا نستطيع قياس سرعات نسبية فقط فإننا نفترض بذلك عدم وجود انحياز في مناطات الإسناد . فقد تكون إحدى سفن الفضاء ، مثلاً ، متجهة إلى القمر بسرعة 10^5 km/day بالنسبة للقمر نفسه ، وصحيح أيضًا أن القمر يتجه إليها بنفس السرعة ، 10^5 km/day . ويمكن التحقق بسهولة من حقيقة أن أحدهما يتحرك بالنسبة للآخر ، ولكن النصين متكافئان ، ولا يمكن أن يقال أن أيًا من الجسمين في حالة سكون بالمعنى المطلق .

افترض ـ مع هذا ـ أن قانونًا من قوانين الطبيعة يعتمد على سرعة مناط الإسناد سيستطيع الأشخاص الموجودون بسفينة الفضاء أن يستخدموا مثل هذا القانون لكي يحددوا سرعتهم ، كما يستطيع الأشخاص على القمر فعل نفس الشيء . . وستكون السرعتان المقاستان مختلفتين . ونتيجة لذلك سيتمكن الأشخاص من قياس أكثر من مجرد سرعاتهم النسبية . والواقع ، أن القانون سوف يستخدم لتشييد تدريج مطلق للسرعات ، وهو ما يناقض الفرض الثاني الذى نعتبره نحن وأينشتين صحيحًا . ونستنتج من ثم أن جميع قوانين الطبيعة لابد وأن تكون هي نفسها في كل مناطات الإسناد ذات القصور الذاتي .

26-2 سرعة الضوء كحد أعلى للسرعة

نستطيع الآن أن نبرهن بالمنطق وحده وباستخدام فرضي أينشتين أنه :

لا يمكن لأي جسم مادى أن يتسارع ليكتسب سرعات أكبر من سرعة الضوء في الفراغ .

ومن السهل البرهنة على صحة هذه المقولة بالطريقة البسيطة التالية . وسنقوم بهذا

متبعين أسلوبًا معروفًا باسم **البرهان غير المباشر** ، ويتم فيه دحض القضية (وهى فى هذه الحالة ، أن جسمًا ما يستطيع الانتقال بسرعة أكبر من c) . وذلك بإثبات أن هذا يؤدى إلى نتيجة زائفة معروفة (وهى فى هذه الحالة أن راصدًا سوف يقيس قيمة تختلف عن c لسرعة الضوء) .

افترض أن لدينا محطتين فضائيتين غير متحركتين بتسارع (غير معجلتين) وهما المحطتان A و B فى الشكل 1-26 ويقومان بعمل مناطى إسناد ذوى قصور ذاتى . وقد أصدر راصدان على كل من A و B تعليماتهما إلى قائد سفينة الفضاء بأن يمضى بها فى خط مستقيم بين A و B بسرعة قصوى ثابتة . وبمجرد أن تمرق بالمحطة A فإنها ترسل نبضة ضوئية من مقدمة السفينة نحو المحطة B . ومن الطبيعى أن المحطتين A و B تعملان بالتنسيق مع بعضهما ولذلك فهما تستطيعان تعيين سرعة سفينة الفضاء وذلك بتحديد زمن طيرانها من A إلى B . سنقوم الآن بطرح افتراض زائف وهو أنهما وجدا أن سرعتها مساوية $2c$.



شكل 1-26:
ما هى أقصى سرعة تتحرك بها سفينة الفضاء بين المحطتين الفضائيتين ؟



يمكن تعجيل البروتونات إلى سرعات تقترب من سرعة الضوء بواسطة معجلات الجسيمات الحديثة مثل هذا المعجل فى معمل فيرمى فى باتافيا بولاية إلينوى ، حيث تقوم مجالات مغناطيسية هائلة بجعل البروتونات تسلك مسارًا دائريًا . وقد صنعت المغناطيسات الحمراء والزرقاء (الحلقة العليا) من ملفات تقليدية من النحاس . أما المغناطيسيات الصفراء والحمراء فهى مغناطيسات فائقة التوصيل . ويبلغ طول المسارات الدائرية فى هذا المعجل أربعة أميال .

لقد أرسلت سفينة الفضاء نبضة ضوئية وهى تمرق بجوار A ، وحيث أن قوانين الطبيعة لابد وأن تكون قائمة بالنسبة للراصدين الثلاثة ذوى القصور الذاتى كلهم (وهم A و B وقائد السفينة) ، فإن النبضة الضوئية لابد وأن يكون سلوكها هو نفسه - أى سلوكًا طبيعيًا - بالنسبة لكل منهم . علينا تذكر أن قائد السفينة لا يستطيع تحديد ما إذا كانت

السفينة تتحرك أم لا بالمعنى النسبي ، وعلى ذلك فلابد له أن يرى نبضة الضوء وهو تسبق السفينة بسرعة مقدارها c فتصل إلى B قبل السفينة . وهكذا فالراصدان A و B إذ يعملان معًا سيريان أن النبضة الضوئية تتحرك أسرع من السفينة . ولكنهما قاسا سرعة السفينة ووجداها تتحرك بسرعة مقدارها $2c$ أى أنهما اكتشفا أن سرعة نبضة الضوء أكبر من $2c$. ولكن هذه النتيجة مستحيلة لأنها تتناقض مع الحقيقة المعروفة أن جميع الراصدين سيحصلون على سرعة واحدة للضوء وهى c . ولنا ، إذن ، أن نستنتج ، أن الفرض الذى طرحناه فى البداية كان زائفًا ، وأن السفينة لا يمكن أن تكون قد تحركت بين A و B بسرعة مقدارها $2c$.

وستؤدى هذه التجربة دائمًا إلى هذا التناقض طالما أصررنا على أن سرعة السفينة أكبر من c . ونستنتج من ذلك أن سفينة الفضاء لا يمكنها أن تطير بسرعة أكبر من سرعة الضوء المقاسة c . ونستطيع بالفعل ، أن نوسع من هذا الاستدلال المنطقى ليشمل كل الأجسام المادية والإشارات التى تحمل طاقة ، وتكون نتيجة هذا أن ننص على أنه :

لا يمكن لأى شىء يحمل طاقة أن يعجِّل حتى تصل سرعته إلى سرعة الضوء c .

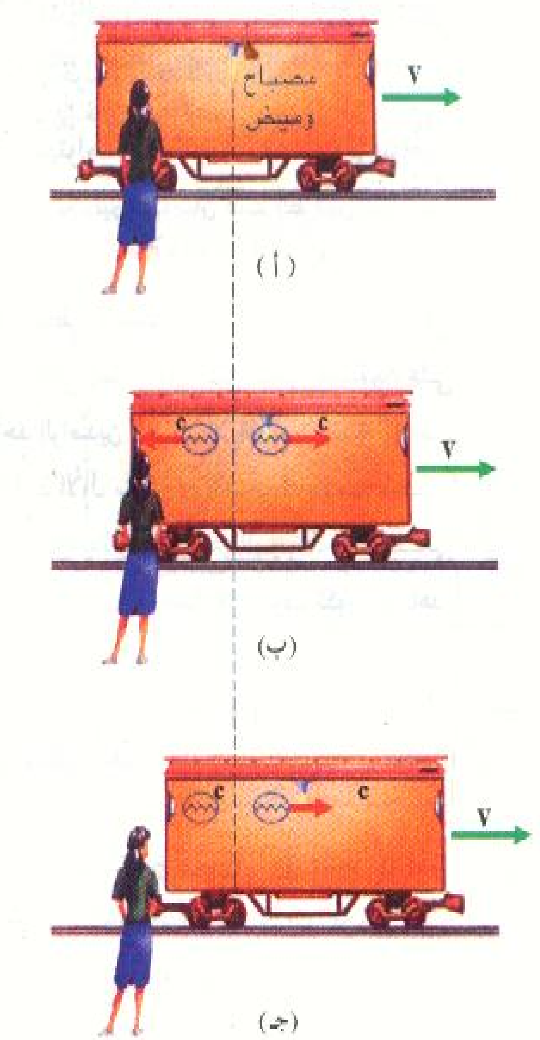
وسنرى كلما أوغلنا فى هذا الفصل أن هذه النتيجة لنظرية أينشتين قد اختبرت مرارًا وتكرارًا وبعناية فائقة وأثبتت جميع الاختبارات صحتها .

26-3 التزامن

من المتوقع عادة أن اثنين من الراصدين سيتفقان فيما بينهما إذا كانت حادثتان تقعان فى نفس اللحظة أم لا . إلا أن أينشتين قد أثبت أنه تحت ظروف معينة لا تتفق النتيجة المتوقعة مع الواقع . والفرضان الأساسيان للنسبية يدفعاننا إلى استنتاج أن الحدثين المتزامنين فى مناط إسناد ذى قصور ذاتى قد لا يكونان متزامنين فى مناط إسناد آخر . ولإيضاح هذه الفكرة ببساطة فإننا نلجأ مرة أخرى إلى تجربة ذهنية . وسيكون انتشار نبضة ضوئية كما يرصدها اثنان من الراصدين ذوى القصور الذاتى هو أساس تجربتنا .

افترض أن مقطورة سيارة تتحرك نحو اليمين بسرعة عالية جدًا وثابتة كما فى الشكل 2-26 (أ) ، وأن هناك مصباح وميض عند منتصف المقطورة تمامًا وأنه حين يومض يبعث بنبضات ضوئية نحو اليمين ونحو اليسار . وقد جهزت المقطورة بخلايا كهروضوئية عند كل من طرفيها ، بحيث يستطيع شخص بالمقطورة أن يكتشف لحظة وصول النبضات الضوئية إلى طرفى المقطورة . كما تستطيع سيدة باستخدام جهاز مبتكر أن تقيس حركة النبضتين وهى واقفة ساكنة فوق الأرض . وحيث أن الراصدين موجودان فى مناطى إسناد ذوى قصور ذاتى (وهما المقطورة والأرض) ، فإن كلًا منهما لابد أن يرى نبضتى الضوء وهما تسلكان تبعًا لنفس قوانين الفيزياء . أى أن كلًا من الرجل والسيدة لابد أن يلاحظا أن النبضتين تنتقلان من مصباح الوميض بسرعة مقدارها c . أضف إلى ذلك أن الرجل سيلاحظ أن النبضتين تصلان إلى الكاشفين عند طرفى المقطورة

المتقابلين فى نفس الوقت ، لأنهما سيقطعان نفس المسافة بالضبط ، فى مناط الإسناد الخاص به (وهو المقطورة) .



شكل 2-26:
خلافًا للراصد ذى القصور الذاتى داخل المناط المتحرك ، فإن الراصد الساكن على الأرض لن يرى أن نبضتى الضوء تصلان إلى طرفى المقصورة فى نفس الوقت .

ولنأخذ حالة الرجل أولاً . بالنسبة له ستكون التجربة غاية فى البساطة . فالمصباح ساكن بالنسبة له ومستقر عند منتصف المقطورة . وعندما يومض المصباح فإن نبضتين ضوئيتين تنتقلان مسافتين متساويتين إلى طرفى المقطورة فى زمنين متساويين . (تذكر أنه بالنسبة للرجل لن تختلف التجربة سواء كانت المقطورة تتحرك أم لا . لأن الفرض الثانى يقتضى نتائج متطابقة بالنسبة لأى مناط إسناد ذى قصور ذاتى) . ومن ثم فإن النبضتين الضوئيتين تصلان إلى طرفى المقطورة فى نفس اللحظة أى تكونان متزامنتين .

اعتبر الآن كيف ترى السيدة التجربة . إن قياساتها تظهر أن التجربة تسير طبقًا لقوانين الفيزياء ولذا فإن الموقف يتطور كما فى الشكلين 2-26 (ب) و (جـ) ويلاحظ أن النبضتين تقطعان مسافتين متساويتين إلى اليمين وإلى اليسار فى زمنين متساويين . ولكن حيث أن المقطورة تتحرك نحو اليمين فإن المسافة التى على الضوء قطعها كى يصل إلى الخلية الكهروضوئية اليسرى ستصبح أقصر . ونتيجة لذلك فإن السيدة ستقيس النبضة التى على اليسار على أنها تصل إلى الطرف الأيسر للمقطورة قبل أن تصل النبضة الأخرى إلى الطرف الأيمن . وطبقًا لما ستقوله فإن النبضتين لا تصلان إلى الطرفين فى نفس اللحظة أى لن تكونا متزامنتين .

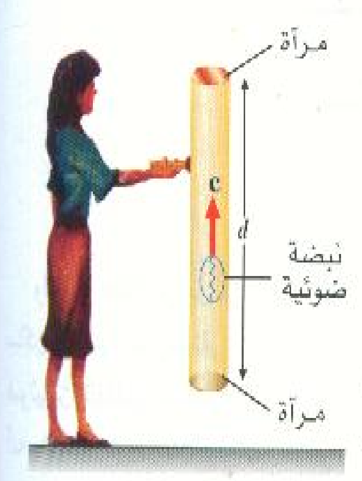
ونستنتج من ثم أن الزمن ليس كمية بسيطة ، لأن :

الأحداث إذا رصدت على أنها متزامنة فى نظام ذى قصور ذاتى فإنها لن ترصد على أنها متزامنة فى نظام ذى قصور ذاتى آخر يتحرك بالنسبة للنظام الأول .

وتبين الاعتبارات المتوالية أن هذا الموقف سيتواجد فقط إذا حدث الحدثان فى موقعين مختلفين . وفى المثال الذى بين أيدينا فإن الحدثين يحدثان عند الطرفين المتقابلين للمقطورة .

من النتائج اللازمة لانعدام التزامن فى مناطى الإسناد ، أن الحدثين اللذين يقعان فى موضعين مختلفين سيظهران لراصدين فى مناطى إسناد ذوى قصور ذاتى مختلفين على أن تتابعهما معكوس . أى أنه لو رأى أحد الراصدين الحدث A يتبعه الحدث B فمن الممكن أن راصدًا آخر يتحرك بالنسبة للراصد الأول سيرى أن الحدث B يتبعه الحدث A . وهذا الأمر ممكن الحدوث فقط لو أن أحد الحدثين لم يكن هو المسبب للحدث الثانى فيزيائيًا . فلو كان A يسبب B فإن العلاقة السببية (A يسبق B) سوف تكون مشاهدة من كل الراصدين وإن كان هناك فترة تخلف زمنى فيما بينهم .

26-4 الساعات المتحركة تدور بشكل أبطأ



شكل 3-26:
تسجل الساعة الضونية طقة واحدة فى كل مرة تنعكس فيها النبضة الضونية من على المرآة السفلى .

لقد لاحظنا من نتائج القسم السابق أن الزمن ليس بالكمية البسيطة . وقد أشار أينشتين إلى هذا عندما أثبت أن المعدل الذى تطقطق به ساعة لشخص يمسك بها يختلف عن المعدل الذى يرصده شخص يمرق من أمام الساعة . وسوف نعرض هذه الظاهرة من خلال تجربة ذهنية باستخدام ساعة خاصة جدًا ، وإن كان أينشتين قد أثبت بشكل عام أنها حقيقية وصحيحة .

اعتبر الساعة التى تمسك بها السيدة فى الشكل 3-26 . إنها عبارة عن نبضة ضوئية تنعكس بين مرآتين مثبتتين داخل أنبوبة أسطوانية مفرغة . وفى كل مرة تصل فيها النبضة الضوئية إلى المرآة السفلى فإن الساعة تطقطق معلنة وحدة زمنية سنطلق عليها « طقة » . فإذا كان طول الأنبوبة $d = 1.5\ \text{m}$ فإن السيدة ستجد أن

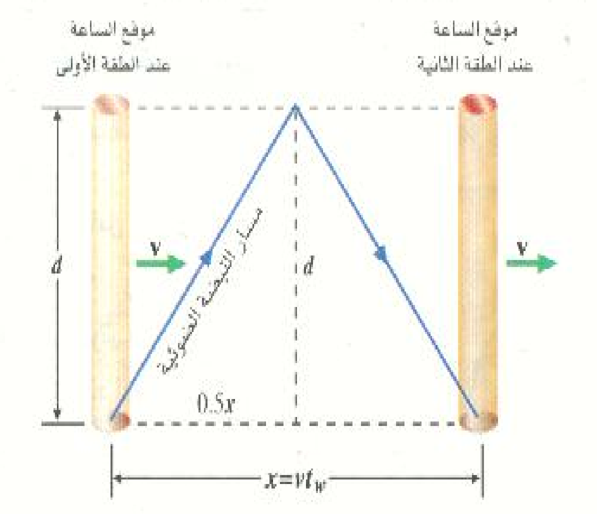
$$\text{طقة واحدة} = \frac{2d}{c} = \frac{3.0\ \text{m}}{3.0 \times 10^{8}\ \text{m/s}} = 10^{-8} s$$

افترض الآن أن شخصًا داخل سفينة فضاء ، يستخدم ساعة شبيهة بهذه الساعة وتخيل أن السيدة تنظر من نافذة معملها (الموجود فى سفينة فضاء أخرى) وترى الرجل يمرق من أمامها بسرعة مقدارها v . وأنها فرحت حين عرفت أنه يستعمل ساعة تشبه ساعتها وأسرعت تتصل به باللاسلكى (بالراديو) : فأخبرها أن ساعته تعمل جيدًا وأنها تطقطق الزمن كالمعتاد ، أى طقة واحدة كل $(2d/c)$ ثانية .

وبعد تفكير لبرهة وجيزة تكتشف السيدة أن هناك أمرًا غريبًا ، فقد استنتجت أن ساعة الرجل لابد وأنها تطقطق الزمن بشكل أبطأ من ساعتها . ونستطيع أن نفهم منطق

السيدة كما يلى :

حيث أن ساعة الرجل تعمل بشكل صحيح بالنسبة له، فإن السيدة تعلم أن ساعته لابد أن تعمل طبقاً للشكل 4–26 ؛ حيث تظهر الساعة فى موضعين عند « طقتين » متعاقبتين . وعلى الرغم من أن الرجل يرى نبضة الضوء فى حركة مستقيمة إلى أعلى



شكل 4–26:
لابد للنبضة الضوئية فى الساعة المتحركة أن تنتقل مسافة أكبر من $2d$ أثناء فترة « طقة » واحد . ويكون طول مسار النبضة الضوئية هو $2\sqrt{d^2+(\frac{1}{2}vt_w)^2}$

وإلى أسفل فى الساعة ، فإن السيدة تؤكد أن النبضة تتحرك فى نفس الوقت إلى اليمين لأن الساعة نفسها تتحرك إلى اليمين* . وتحسب السيدة الزمن بين طقتين حسب ساعة الرجل كما يلى :

طبقاً للسيدة فإن النبضة تتحرك مسافة تمثل بالخط الأزرق فى الشكل . ومن نظرية فيثاغورس والأبعاد المبينة بالشكل فإننا نرى أن :

$$\text{طول مسار النبضة} = 2\sqrt{d^2+(\frac{1}{2}x)^2}$$

وتعلم السيدة أن ساعة الرجل تمر أمامها بسرعة مقدارها v . وبعد ذلك ، فطبقاً لساعتها فإن ساعة الرجل ستستغرق زمناً قدره t_w حتى تنتقل من موقع إلى آخر . وعلى ذلك فهى تعرف أن $x = vt_w$. ونتيجة لذلك ، وطبقاً لهذه السيدة ،

$$\text{طول مسار النبضة} = 2\sqrt{d^2+(\frac{1}{2}vt_w)^2}$$

وتعلم السيدة بعد ذلك أن نبضة الضوء تتحرك دائماً عبر الفراغ بسرعة مقدارها c ومن ثم ـ وطبقاً لمعلوماتها ـ فإن الزمن الذى يستغرقه التغير فى الموقع والمبين فى الشكل 4–26 يجب أن يكون :

$$t_w = \frac{\text{طول مسار النبضة}}{c} = \frac{2\sqrt{d^2+(\frac{1}{2}vt_w)^2}}{c}$$

ويؤدى بنا حل هذه المعادلة إلى إيجاد قيمة t_w ،

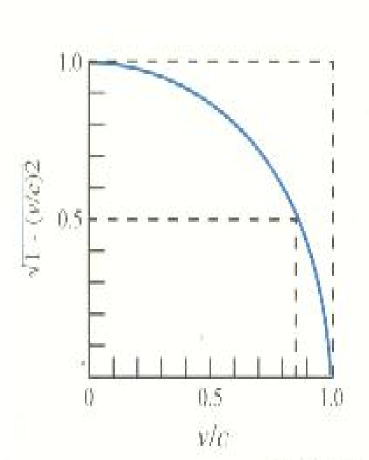
* قد يطرأ على ذهنك السؤال التالى : « أيهما على حق ؟ » إن كليهما على حق كما سنرى على الفور ، فكل شخص يصف السلوك بشكل صحيح وكما يقيسه فى مناط إسناده .

$$t_w = \frac{2d/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

ولكننا عرفنا أن $2d/c$ هو الزمن الذى يصر الرجل على أنه الزمن الذى تستغرقه ساعته لكى تحدث « طقة » واحدة . ومن ثم يصبح لدينا النتيجة التالية :

$$\text{(الفترة الزمنية كما تعينها الساعة المتحركة)} \times \left[\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right] = \text{الفترة الزمنية كما تعينها الساعة الساكنة}$$

ويسمى المقدار $\sqrt{1-(v/c)^2}$ **مُعامل النسبية** . يبين الشكل 5-26 . العلاقة البيانية بين معامل النسبية والمقدار v/c ، ويلاحظ أن هذا المعامل يساوى الوحدة تقريبا إلى أن تصبح السرعة أكبر من نحو 10 بالمائة من سرعة الضوء . وحتى عندما $v = 0.10\,c$ فإن هذا المعامل يساوى 0.995 . وفى معظم مشاهداتنا اليومية تقريبًا فإننا لا نتعامل مع تأثيرات النسبية لأننا لا نلتقى مطلقًا بسرعات تبلغ هذه القيم الهائلة . على أننا عندما نعالج الجسيمات الذرية معمليًا ، فإن ظواهر النسبية تصبح أكثر شيوعًا ولا نستطيع تفسير النتائج المعملية دون أن نأخذ معادلات أينشتين فى الاعتبار .



شكل 5-26:
يختلف مُعامل النسبية بشكل محسوس عن الوحدة ، فقط ، عند سرعات تقترب من سرعة الضوء .

وسنعرض الآن مثالاً على تأثير مُعامل النسبية . افترض أن الرجل يعرق أمام السيدة بسرعة تبلغ $0.75\,c$. عندئذ يكون المقدار $\sqrt{1-(v/c)^2}$ مساويًا 0.66 ومقلوبه 1.51 . وتحت هذه الظروف فإن ساعة السيدة ستحدث 1.51 طقة خلال الزمن الذى تعلم السيدة فيه أن ساعة الرجل ستحدث طقة واحدة . وكما نرى فإن الساعة المتحركة تطقطق الزمن بشكل أبطأ من الساعة الساكنة .

تطقطق الساعة التى تتحرك بسرعة مقدارها v زمنا مقداره $\sqrt{1-(v/c)^2}$ ثانية خلال زمن قدره ثانية واحدة على الساعة الساكنة .

وبعد أن وصلت السيدة إلى هذه النتيجة غير المتوقعة فإنها اتصلت بالرجل عبر الراديو وأخبرته بأنها اكتشفت أن الساعات المتحركة تطقطق الزمن أكثر بطئًا وقبل أن تشرح له التفاصيل بادرها بقوله أنه كان يفكر طوال الوقت فى نفس الموضوع وأنه قد اكتشف أن ساعتها التى كانت تتحرك بالنسبة إليه بسرعة مقدارها v كانت تطقطق الزمن أكثر بطئًا من ساعته . وعندئذ تذكر الاثنان أن الحركة النسبية فقط هى التى تحمل معنى . ولم تكن أى من الساعتين ذات سمات خاصة .

ستبدو أى ساعة تتحرك بالنسبة لراصد ما على أنها تطقطق الزمن أكثر بطئًا من ساعة ساكنة بالنسبة للراصد .

ويطلق على هذه الظاهرة **تمديد الزمن** ، لأن الزمن قد « استطال » على نحو ما بالنسبة للساعات المتحركة .

تنطبق هذه النتيجة المدهشة على جميع آليات التوقيت مهما كان تعقيدها . فلو كان الرجل يستخدم معدل نمو فطر ما بدلاً من الساعة لكانت السيدة قد وجدت أن معدل نمو

القطر يتباطأ بسبب رحلته . بل أنه حتى تقدم جسم الإنسان في العمر يتباطأ عند الحركة بسرعات كبيرة ، كما سنرى في أحد الأمثلة التالية .

على أن هناك نقطة واحدة ، على المرء أن يتذكرها دائمًا . تعمل الساعة الجيدة دائمًا بشكل طبيعي كما يراها شخص يكون ساكنًا بالنسبة لها . أما الراصدون الذين يمرون أمام الساعة فقد يزعمون أنها تطقطق الزمن أكثر بطئًا وعلى الرغم من هذا فالساعة لا زالت تطقطق الزمن بشكل صحيح كما يراها الراصد الساكن بالنسبة لها . ويطلق على الزمن الذى تطقطقه الساعة حين تكون ساكنة بالنسبة للراصد **الزمن الصحيح** .

مثال توضيحى 26-1

من الأمثلة المثيرة عن تمديد الزمن ، ما نحصل عليه عند قياس الفترة التى « تعيشها » الجسيمات غير المستقرة . فجسيم يطلق عليه بيون ـ مثلاً ـ يعيش نحو 2.6×10^{-8} s فحسب في المتوسط حين يكون ساكنًا فى المعمل ؛ ويتحول بعد هذه الفترة إلى صورة أخرى . كم سيبلغ عمر مثل هذا الجسيم لو أنه انطلق عبر المعمل بسرعة مقدارها $0.95\,c$ ؟

استدلال منطقى :

يتحرك البيون بسرعة مقدارها $0.95\,c$ بالنسبة للراصدين الموجودين فى المعمل . ويجب أن تثبت التجارب أن ساعة البيون الداخلية التى تحكم الفترة التى يعيشها ؛ لابد أن تتباطأ بسبب حركته . والزمن 2.6×10^{-8} s الذى تبينه الساعة المتحركة سيكون على النحو التالى عندما تبينه ساعة المعمل :

$$\text{عمر البيون طبقًا لساعة المعمل} = \frac{2.6\times10^{-8}\ \text{s}}{\sqrt{1-(0.95)^2}} = 8.3\times10^{-8}\ \text{s}$$

وكما نرى فالجسيم المتحرك يجب أن يعيش لفترة أطول ثلاث مرات من الجسيم الساكن . لقد أجريت تجارب كهذه وتجارب أخرى شبيهة ووجد أن نتائجها جميعًا تتفق مع النتائج المحسوبة .

تمرين : ما السرعة التى يتحرك بها البيون إذا كان « يعيش » 10^{-7} s ؟

الإجابة : $v/c = 0.966$.

مثال 26-1

إن أقرب نجم من مجموعتنا الشمسية هو ألفا سنتورى الذى يبعد عن الأرض مسافة 4.1×10^{16} m ، وحيث أن الضوء ينتقل بسرعة 3×10^{8} m/s فإن نبضة الضوء الصادرة من ذلك النجم تستغرق 1.37×10^{8} s أو 4.3 yr. كى تصل إلى الأرض . (ولذا يقال أن المسافة إلى ذلك النجم 4.3 سنة ضوئية) . كم من الوقت تستغرقه سفينة فضاء فى رحلة ذهابًا وإيابًا إلى ذلك النجم ـ مقاسًا بالساعات الأرضية ؛ إذا كانت سرعتها $0.9990\,c$ ؟ وكم تبلغ هذه الفترة طبقًا للساعات الموجودة بالسفينة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : بالنسبة لأى شىء قيست سرعة سفينة الفضاء ؟

الإجابة : اعتبر أن المسافة بين الأرض وألفا سنتورى ثابتة وسرعة السفينة بالنسبة للأرض 0.9990 c . وتتفق قياسات الأشخاص الموجودين على ظهر السفينة والأشخاص الباقين على الأرض حول هذه القيمة .

سؤال : أى الساعات ستقيس الوقت « الصحيح » ؟

الإجابة : إنها الساعات الأرضية لأنها ساكنة فى نظام مناط إسناد الأرض ـ ألفا سنتورى .

سؤال : ما هى السرعة التى سيبدو أن ساعات سفينة الفضاء تدور بها ؟

الإجابة : ستبدو تلك الساعات وهى تدور أبطأ بمقدار معامل النسبية ، $\sqrt{1-(v/c)^2}$.

الحل والمناقشة : ستقيس الساعات الأرضية زمن رحلة الذهاب والإياب على أنها :

$$t=\frac{d}{v}=\frac{2(4.3\ \text{light yr.})}{1.0\ \text{light yr./yr.}}=8.3\ \text{yr.}$$

ومعامل النسبية هو

$$\sqrt{1-(0.999)^2}=0.045$$

وعلى ذلك ستكون ساعات سفينة الفضاء قد قاست زمنًا مقداره :

$$(8.6\ \text{yr.})\ (0.045)=0.39\ \text{yr.}$$

فقط

وهو أقل قليلاً من خمسة أشهر !

وبهذه المناسبة فإن أحد توائم الملاحين بالسفينة قد ترك على سطح الأرض فزاد عمره 8.6 yr. خلال زمن الرحلة ، فى حين أن توأمه على ظهر سفينة الفضاء قد زاد عمره 0.39 yr. فحسب . وقد نوقشت هذه الظاهرة التى أطلق عليها **التناقض الظاهرى للتوائم** بالتفصيل من جانب العلماء ، الذين اتفقوا بشكل عام على أن هذه النتيجة صحيحة وأن التوأمين سيزداد عمراهما بشكل مختلف* .

26-5 الانكماش النسبوى للطول

تقتضى ظاهرة تمديد الزمن وجود ظاهرة غريبة تتعلق بالأطوال المقاسة . ولكى ندرك كنه هذه الظاهرة علينا أن نرجع مرة أخرى إلى مثال الرجل والسيدة الذى ذكر فى القسم السابق . دعنا نعتبر أن السيدة مستقرة على الأرض بينما يسافر الرجل بسرعة مقدارها v على طول خط مستقيم يمتد من الأرض إلى النجم ألفا سنتورى . ويفيدنا رجال الفلك الموجودون على الأرض أن النجم يبعد عن الأرض مسافة مقدارها $d = 4.1 \times 10^{16}$ m .

* ولكى نختبر هذه الظاهرة فإن ساعة غاية فى الدقة قد نقلت على متن طائرة حول الأرض ثم قورنت مع ساعة « توأم » لها ساكنة . وقد وجدت النتيجة المتوقعة . وإذا أردت الإطلاع على مناقشة للتجربة فارجع إلى المرجع التالى : J.Hafele, Physics Teacher, 9,414, (1971) .

وحيث أنه من السهل قياس السرعات النسبية ، فإن كـلاً مـن الرجـل والسيدة متفقان على أن سرعة كل منهما بالنسبة للآخر هي v عندما أخذ الرجـل فـي الانطلاق داخـل سفينة الفضاء من الأرض نحو النجم . أما السيدة فهي ساكنة في مناط إسناد تكـون فيـه الأرض والنجم أيضًا في سكون أنها ترى أن الرجل يمرق أمامها بسرعة مقدارها v .

الرجل ساكن بالنسبة لسفينته الفضائية ويعتبر السـفينة نفسها هـي مناط إسناده . وكل من الأرض والنجم يعتبران في حركة بسرعة مقدارها v بالنسبة للسفينة .

دعنا الآن نفحص رحلة الرجل من الأرض إلى النجم من واقع أفضلية السيدة .

إنها تعلم أن المسافة من الأرض إلى النجم ، وكلاهما في سكون بالنسبة لمناط إسنادها هي $d_e = 4.1 \times 10^{16}$ m ، حيث يرمز الحرف e إلى الأرض . وباستعمال العلاقة $x = vt$ فإنها ستحسب الزمن الذي تسجله الساعة الأرضية لرحلة الرجل نحو النجم على أنه :

$$t_e = \text{الزمن الأرضي} = \frac{d_e}{v}$$

وبالفعل ، حين تستدير السفينة عائدة إلى الأرض بعد أن بلغت النجم ، فإن الزمن الذي استغرقته الرحلة كلـها سيكون $2\,t_e = 2d_e / v$.

إلا أن حسابات الرجل ستكون مختلفة فحسب الساعات الموجودة بسفينة الفضاء سيكون زمن الرحلة من الأرض إلى النجم هو t_s . ومن ثم يستطيع أن يحسب المسافة إلى النجم على أنها $x = vt$ ويصل إلى :

$$d_s = vt_s$$

حيث يشير الحرف s إلى القياسات التي تمت في مناط إسناد ساكن بالنسبة لسـفينة الفضاء وبإجراء حسابات مماثلة لرحلة العودة فإنه يجد أن الرحلة بأكملـها قد قطعت مسافة $2d_s$ في زمن مقداره $2t_s$.

وعلى ذلك يصبح لدينا المعادلتان التاليتان وهما صحيحتان دون أدنى شك بالنسبة للراصدين اللذين صاغاهما :

$$2d_e = v(2t_e) \qquad , \qquad 2d_s = v(2t_s)$$

ولكننا نعرف أن تمديد الزمن يؤثر على ساعة سفينة الفضاء ، بحيث أننا لو قارناها بالساعة الأرضية عند عودة السفينة إلى الأرض فسنجد أن :

$$t_s = \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\,.\,t_e$$

أي أن ساعة سـفينة الفضاء قد طقطقت الزمن بشكل أبطأ من الساعة الأرضيـة . وبالتعويض من هذه القيمة للزمن t_s في معادلة d_s نجد أن :

$$d_s = v\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\,.\,t_e$$

على أن $d_e = vt_e$ ولذلك فإن $t_e = d_e / v$. وإذا استخدمنا هذه القيمة للزمن t_e فإن :

وحيث أنه من السهل قياس السرعات النسبية ، فإن كـلاً مـن الرجـل والسيدة متفقان على أن سرعة كل منهما بالنسبة للآخر هى v عندما أخذ الرجـل فـى الانطـلاق داخـل سفينة الفضاء من الأرض نحو النجم . أما السيدة فهى ساكنة فى مناط إسناد تكـون فيـه الأرض والنجم أيضًا فى سكون أنها ترى أن الرجل يمرق أمامها بسرعة مقدارها v .

الرجل ساكن بالنسبة لسفينته الفضائية ويعتبر السـفينة نفسـها هـى منـاط إسناده . وكل من الأرض والنجم يعتبران فى حركة بسرعة مقدارها v بالنسبة للسفينة .

دعنا الآن نفحص رحلة الرجل من الأرض إلى النجم من واقع أفضلية السيدة .

إنها تعلم أن المسافة من الأرض إلى النجم ، وكلاهما فى سكون بالنسبة لمناط إسنادها هى $d_e = 4.1 \times 10^{16}$ m ، حيث يرمز الحرف e إلى الأرض . وباستعمال العلاقة $x = vt$ فإنها ستحسب الزمن الذى تسجله الساعة الأرضية لرحلة الرجل نحو النجم على أنه :

$$t_e = \text{الزمن الأرضى} = \frac{d_e}{v}$$

وبالفعل ، حين تستدير السفينة عائدة إلى الأرض بعد أن بلغت النجم ، فإن الزمن الذى استغرقته الرحلة كلـها سيكون $2\,t_e = 2d_e / v$.

إلا أن حسابات الرجل ستكون مختلفة فحسب الساعات الموجودة بسفينة الفضاء سيكون زمن الرحلة من الأرض إلى النجم هو t_s . ومن ثم يستطيع أن يحسب المسافة إلى النجم على أنها $x = vt$ ويصل إلى :

$$d_s = vt_s$$

حيث يشير الحرف s إلى القياسات التى تمت فى مناط إسناد ساكن بالنسبة لسـفينة الفضـاء وبإجراء حسابات مماثلة لرحلة العودة فإنه يجد أن الرحلة بأكملـها قـد قطعـت مسـافة $2d_s$ فى زمن مقداره $2t_s$.

وعلى ذلك يصبح لدينا المعادلتان التاليتان وهما صحيحتان دون أدنـى شـك بالنسـبة للراصدين اللذين صاغاهما :

$$2d_e = v(2t_e) \qquad , \qquad 2d_s = v(2t_s)$$

ولكننا نعرف أن تمديد الزمن يؤثر على ساعة سفينة الفضاء ، بحيث أننا لو قارناها بالساعة الأرضية عند عودة السفينة إلى الأرض فسنجد أن :

$$t_s = \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\cdot t_e$$

أى أن ساعة سفينة الفضاء قد طقطقت الزمن بشكل أبطأ من الساعة الأرضيـة .

وبالتعويض من هذه القيمة للزمن t_s فى معادلة d_s نجد أن :

$$d_s = v\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\cdot t_e$$

على أن $d_e = vt_e$ ولذلك فإن $t_e = d_e/v$. وإذا استخدمنا هذه القيمة للزمن t_e فإن :

$$d_s = \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\, d_e$$

وبعبارة أخرى فإن المسافة بين الأرض والنجم . إذا قيست بساعة الرجل فى سفينته الفضائية ستكون أقصر من المسافة التى يقيسها الفلكيون وهم على سطح الأرض . فمن الظاهر إنه إذا كنت تتحرك بالنسبة لنقطتين بينهما مسافة ثابتة ، فإن المسافة بين النقطتين ستبدو أقصر مما لو كنت ساكنًا بالنسبة لهما . والنسبة بين المسافتين هى معامل النسبية ، $\sqrt{1-(v/c)^2}$.

لقد وجد أينشتين أن هذه نتيجة عامة ، ويمكننا تلخيصها كما يلى :

لو أن جسمًا وراصدًا كانا فى حركة نسبية بسرعة مقدارها v ، فإن الراصد سيقيس طول الجسم المتحرك كما لو كان قد انكمش على طول خط الحركة بمعامل مقداره $\sqrt{1-(v/c)^2}$.

يلاحظ أن الانكماش لا يحدث سوى باتجاه خط الحركة ؛ ولا يلاحظ أى انكماش عموديًا على خط الحركة . ويسمى طول جسم ما إذا قيس بواسطة راصد ساكن بالنسبة للجسم **الطول الصحيح** .

نستطيع الآن أن نوفق بين قياسات الراصدين على سطح الأرض فى المثال 1-26 وتلك التى يقوم بها من يسافر داخل سفينة الفضاء . ومعامل انكماش الطول هو نفسه معامل استطالة - أو تمديد - الزمن وهو 0.045 . ويمكننا اعتبار المسافة بين الأرض والنجم ألفا سنتورى على أنها طريق طويلة جدًا تتحرك مارة بسفينة الفضاء . وحين تقاس هذه الطريق من فوق الأرض فإن طولها يكون هو الطول الصحيح ، ولكن حين تقاس من داخل سفينة الفضاء فإن طولها سينكمش إلى المقدار :

$d_{\text{سفينة}} = 0.045\, d_{\text{أرض}} = (0.045)$ (4.3 سنة ضوئية)

$=$ 0.19 سنة ضوئية

يرى ركاب السفينة أنفسهم وكأنهم ينطلقون عبر هذا الطريق بسرعة مقدارها $v = 0.999\, c$. ولذلك فهم يستنتجون دون أدنى دهشة أن الرحلة ذهابًا وإيابًا ستستغرق منهم :

$t_{\text{سفينة}} = 2$ (0.194 سنة ضوئية) / (0.999 سنة ضوئية / سنة) = 0.39 سنة

مثال توضيحى 2-26

يمسك رائد فضاء بساق طولها متر واحد فى يده أثناء سفره داخل سفينة فضاء تنطلق بسرعة كبيرة . ماذا يلاحظ ذلك الرائد فيما يتعلق بطول الساق . إذا أدارها من الوضع الذى كانت توازى فيه اتجاه الحركة إلى وضع متعامد معه ؟

استدلال منطقى : لن يلاحظ أى تغير فى طول الساق . إن انكماش الطول يتعلق

بالأجسام التى تتحرك بسرعات كبيرة بالنسبة للراصد ؛ فى حين أن الساق تعتبر ساكنة بالنسبة لرائد الفضاء . ■ .

6-26 العلاقة النسبوية بين الكتلة والطاقة

لقد ذكرنا فى القسم 3-12 أن نظرية النسبية لأينشتين تتنبأ بأن كتلة جسم ما تعتمد على مقدار سرعته ، وأن هذا التأثير يصبح ملحوظًا جدًا عندما تقترب تلك السرعة من سرعة الضوء c ، وبما أننا لم نكن حينئذ قد تعرفنا على فروض النسبية لشرح هذا التأثير فسنفعل ذلك الآن .

تنص هذه الفروض ـ كما رأينا فى القسم 2-26 ، على أنه لا يمكن تعجيل جسم إلى سرعات تزيد على سرعة الضوء . ويصطدم هذا القيد المفروض على السرعة مع قوانين نيوتن للحركة . كما أشرنا فى الفصل الثالث . فقوانين نيوتن تتنبأ بأن سرعة جسم ما قد تستمر فى الزيادة دون قيود طالما استمرت القوة المحصلة فى التأثير على الجسم :

$$v = v_0 + at = v_0 + \frac{F}{m}t$$

حيث اعتبرت كتلة الجسم m ثابتة . وهذه المعادلة تخرق حد السرعة الذى يفترضه أينشتين ، لأنه بعد فترة زمنية كافية سيصبح القدار $v_0 + (F/m)t$ أكبر من c . وقد قرر أينشتين أنه لكى يظل التوافق مع فروض النسبية ومع قانون بقاء كمية التحرك ، فإن كتلة الجسم لابد أن تتزايد بزيادة سرعته . وبهذه الطريقة يقل المقدار F/m مع زيادة t ، بحيث تقترب v من القيمة الحدية للسرعة وهى c عندما يصبح t كبيرًا جدًا . وقد أدت فروض أينشتين به إلى استنتاج أن العلاقة بين الكتلة والسرعة لابد أن تكون على الصورة :

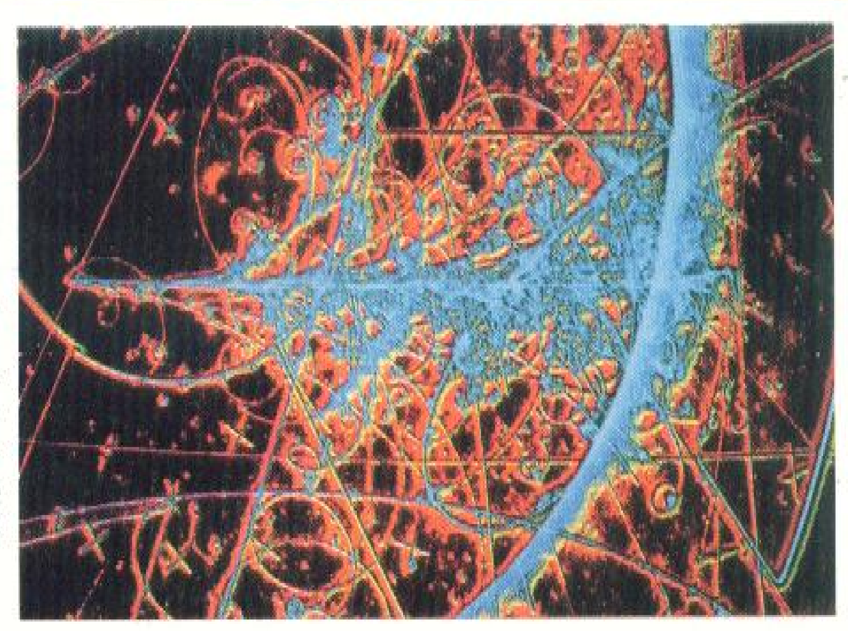
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad (26\text{-}1)$$

حيث يطلق على m_0 **كتلة السكون** ، وهى تساوى الكتلة التى استخدمناها فى قوانين نيوتن . أما الكتلة التى تعتمد قيمتها على السرعة فتسمى **الكتلة الظاهرية** للجسم .

ويبين الشكل 3-22 المنحنى البيانى الذى يمثل تغير الكتلة مع السرعة ، ويتضح منه أن الكتلة الظاهرية m تظل قريبة من قيمة كتلة السكون m_0 طالما كان المقدار v/c أقل من بضعة أعشار . وكلما اقتربت v من c ، أى كلما $v/c \to 1$ فإن $\sqrt{1-v^2/c^2} \to \sqrt{1-1} = 0$ وهو ما يجعل الكتلة الظاهرية تقترب من ما لا نهاية :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-1}} = \infty$$

وتغير الكتلة مع السرعة ، يمكن أن يستخدم لتبرير حقيقة أنه لا يمكن أن يعجل أى جسم إلى سرعات تزيد على سرعة الضوء ، فالكتلة اللانهائية تستلزم قوة لانهائية



يمكننا دراسة شحنة وطاقة الجسيمات النووية من خلال الآثار التى تتركها وهى تمر من خلال غرفة فقاعية والتى تشبه المبينة هنا . وتكون تلك الآثار ـ بالنسبة للجسيمات المشحونة ـ منحنية بسبب وجود مجال مغناطيسى مستعرض بالنسبة لاتجاه الحركة . وكثيرًا ما تظهر آثار منحنية فى اتجاهين متضادين لزوج من الإلكترون والبوزيترون وهما جسيمان مشحونان بشحنتين متضادتين ولهما كتلتان متساويتان ويولد هذان الجسيمان من شعاع جاما منفرد . والطاقة الكلية للزوج المحسوبة مساوية لطاقة شعاع جاما وذلك طبقًا لتنبؤات أينشتين فى المعادلة $E = mc^2$.

لتعجيلها . وحيث أن القوى اللانهائية غير متاحة عملية ، فإن الواضح أن جسمًا سرعته $v \to c$ لا يمكن أن يُعجل إلى سرعة الضوء ، وهى السرعة التى تكون الكتلة عندها لا نهائية .

إن القوة التى تعمل على تعجيل (تسارع) جسم ما ، تزود ذلك الجسم بالطاقة . ونعلم أنه عند السرعات المنخفضة يكون الشغل المبذول من جانب القوة الخالصة المطبقة مساويًا للزيادة فى طاقة حركة الجسم ما لم تكن هناك تغيرات ملموسة فى طاقة الوضع والشغل نتيجة الاحتكاك . ويظل هذا الأمر صحيحا عند سرعات قريبة من c ، وإن كانت طاقة حركة الجسم عندئذ ليست مجرد $\frac{1}{2}m_0v^2$ ، كما وأنها ليست كما قد يخمن البعض $\frac{1}{2}mv^2$. إذ إنها بدلا من ذلك ستكون :

$$K.E = (m - m_0)(c^2) \qquad (26\text{–}2)$$

وتختصر* المعادلة (2–26) ، عندما $v \ll c$ ، إلى المعادلة الكلاسيكية لطاقة الحركة ، $KE = \frac{1}{2}m_0v^2$.

وعندما لا تكون على علم بسرعة الجسم ولكنك تعرف مقدار الطاقة التى أعطيت لذلك الجسم ، فإن هناك وسيلة مفيدة جدًا لتحديد ما إذا كان عليك أن تستخدم المعادلة (2–26) أو $\frac{1}{2}m_0v^2$ لحساب طاقة حركة الجسم . عليك أولاً أن تحسب طاقة كتلة

---

* لإثبات هذا ، يمكننا الرجوع إلى الحقيقة الرياضية أنه إذا كانت $x \ll 1$ ، فإن المقدار $1/\sqrt{1-x} \cong 1+\frac{1}{2}x$. ومن ثم ، إذا سمينا المقدار $(v/c)^2$ بالرمز x ، فى حالة $(v/c)^2 \ll 1$ ،

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \cong m_0\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

وعندئذ تصبح المعادلة (2–26) على الصورة :

$$KE = mc^2 - m_0c^2 \cong m_0c^2 + \frac{m_0}{2}\frac{v^2}{c^2}c^2 - m_0c^2 = \frac{1}{2}m_0v^2$$

سكون الجسم m_0c^2 ، ثم تقارنها بمقدار الطاقة التى أعطيت للجسم . فإذا كانت تلك الطاقة أكبر من واحد أو اثنين من عشرة أجزاء من طاقة كتلة سكون الجسم فعندئذ يقال أن الجسم « نسبوى » وعليك استخدام المعادلة (2–26) . أما إذا كانت الطاقة المعطاة للجسم أقل من ذلك ، فإن الجسم يكون عندئذ « كلاسيكى » وتكون المعادلة $KE = \frac{1}{2}m_0v^2$ عندئذ كافية . (وكما هو الحال دائمًا ، فإن هذا يعتمد على الدقة التى تحتاجها فى حساباتك) .

تنص المعادلة (2–26) على أن طاقة الحركة هى الفرق بين الحدين mc^2 و m_0c^2 وعلاوة على ذلك فهى تقتضى أن يظل الجسم محتويًا فى حالة السكون (KE = 0) على بعض الطاقة الأساسية ، m_0c^2 ، وهى ما نطلق عليه **طاقة كتلة السكون** . وقد تمكن أينشتين من إثبات أن علاقة شبيهة بالمعادلة (2–26) يمكن أن تنطبق على كل أنواع الطاقة . وقد أثبت أنه **بالنسبة لأى تغير فى طاقة جسم ما ، فإن هناك تغيرًا مناظرًا فى كتلة الجسم** ، ويعطى بالمعادلة :

$$\Delta E = \Delta mc^2 \tag{26-3}$$

(وغالبًا ما تكتب هذه العلاقة على صورة $E = mc^2$ وهى من أشهر معادلات أينشتين) . يلاحظ أن المعادلة (3–26) يمكن أن تكتب أيضًا على الصورة $\Delta m = \Delta E/c^2$. وحيث أن c^2 مقدار هائل ، فإن الأمر يقتضى أن التغيرات الملموسة فى الكتلة لابد لها من تغيرات ضخمة فى الطاقة . والتغيرات التى نتعامل معها فى عالمنا اليومى « الكلاسيكى » فى مجال التفاعلات الكيميائية أو التغيرات الصغيرة فى طاقة الحركة أو طاقة الوضع أصغر من أن تتسبب فى تغيرات ملموسة فى الكتلة . أما عندما نرصد تغيرات فى الطاقة عند حدوث تفاعلات نووية فقط ، فإن تغير الكتلة يصبح واضحًا بشكل مؤثر كما سنرى .

مثال 2-26

تتسارع الإلكترونات (تعجَّل) بشكل روتينى فى المعامل خلال جهد كهربى يصل إلى مليون فولت ، فتكتسب عندئذ طاقة حركة مقدارها 1 MeV . ما هى سرعة هذه الإلكترونات وما كتلتها التى تقيس فى مناط إسنادنا ؟

استدلال منطقى :

1

سؤال : كيف أتعرف على العلاقة الصحيحة بين KE والسرعة حتى أستعملها هنا ؟

الإجابة : عليك أن تحسب أولاً طاقة كتلة السكون للإلكترون . فحيث أن $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$ kg فإن $m_0c^2 = 8.2 \times 10^{-14}$ J = 0.511 MeV . وحيث أن KE = 1 MeV فإن هذه الإلكترونات نسبوية بالتأكيد وعليك استعمال المعادلة (2–26) لحساب طاقة الحركة لها .

سؤال : كيف تدخل السرعة فى المعادلة (2–26) ؟

الإجابة : تعتمد الكتلة على السرعة حسب المعادلة (1-26) وإذا وضعنا قيمة m من المعادلة (1-26) في المعادلة (2-26) سنحصل على معادلة للمقدار v/c :

$$\mathrm{KE} = m_0 c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-1\right)$$

الحل والمناقشة : تعطينا المعادلة السابقة ما يلي :

$$\frac{\mathrm{KE}}{m_0c^2}+1=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

وبتربيع الطرفين وأخذ المقلوب ، نجد :

$$1-\frac{v^2}{c^2}=\frac{1}{(\mathrm{KE}/m_0c^2+1)^2}=\frac{1}{8.74}=0.114$$

ومن هنا نجد أن $(v^2/c^2)=0.886$ أو $v/c=0.941$. أى أن الإلكترونات تتحرك بسرعة تصل إلى 94 بالمائة من سرعة الضوء ؛ وكتلة هذه الإلكترونات تقارب ثلاثة أمثال كتلة السكون :

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{0.114}}=2.96\ m_0$$

تمرين : عين السرعة المتوقعة كلاسيكيًا لهذه الإلكترونات .
الإجابة : $5.93\times10^8\ \mathrm{m/s}\approx 2c$!

مثال توضيحى 3-26

الطاقة الكيميائية فى تفاحة تزن 100 g هى 100 kcal تقريبًا (ويتغاضى علماء التغذية عن اللازمة kilo ويسمون هذه الوحدة سعرًا Calory) . وقد عرفنا من دراستنا أن 1 cal من الحرارة يكافئ 4.18 J من الطاقة ، أى أن التفاحة بها 420 kJ من الطاقة المتاحة . قارن بين هذه الطاقة والطاقة الناتجة من تحويل كل كتلة التفاحة إلى طاقة .

استدلال منطقى : طبقًا لمعادلة الكتلة والطاقة فإن :

الطاقة = Δmc^2

وفى هذه الحالة $\Delta m=0.10\ \mathrm{kg}$ و $c=3\times10^8\ \mathrm{m/s}$ مما يعطى ،

الطاقة = $9\times10^{15}\ \mathrm{J}$

ومن هنا نرى أننا عندما نأكل تفاحة فإننا لا نحصل إلا على كسر صغير جدًا (5×10^{-11}) من طاقتها الإجمالية . ■

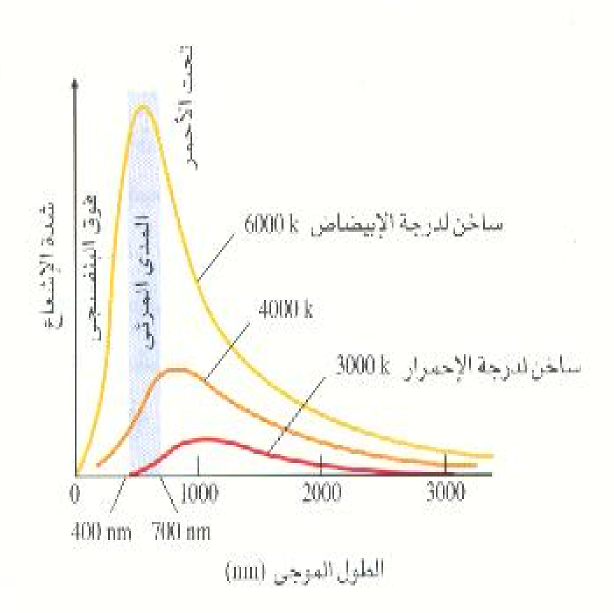
الجزء الثانى : الفوتونات

26-7 اكتشاف بلانك

فى عام 1900 وقبل أن يقدم أينشتين نظريتـه للنسبية بخمسة أعوام قام بلانـك (1858 – 1947) باكتشاف بدا وكأنه أقل من أن يهز الدنيا فى ذلك الوقت ، ولكننا نعتبره اليوم كـأول ما ظهر من صندوق « باندورا » الملئ بالعجائب . لقد انخرط بلانك مـع آخريـن فـى محاولـة لتفسير الإشعاع المنبعث من أجسام ساخنة غير عاكسة ، يطلق عليها **الأجسـام السـوداء** (القسم 11-11) . وقد أشارت القياسات الدقيقة لشدة الإشعـاع المنبعـث مـن الأجسام الساخنة فى المدى المرئى وتحت الأحمر وفوق البنفسجى أن تلك الشدة تتغير مع الطـول الموجى طبقًا لما هو ممثل فى الشكل 6–26 . وكما هو واضح فإن كسـرًا صغيرًا فقط مـن الإشعاع المنبعث يشتمل على أطوال موجية فـى المدى المرئـى مـن الطيـف ، وأن أغلـب الإشعاع فى مدى الأشعة تحت الحمراء . وعلاوة على ذلك ، فإن قمة الإشعاع تتزحزح من المدى تحت الأحمر إلى المدى المرئى مع ارتفاع درجات الحرارة ويتفق هذا مع خبراتنا بـأن الجسم الساخن إلى درجة الابيضاض يكون أكثر سخونة من الساخن إلى درجة الإحمرار .

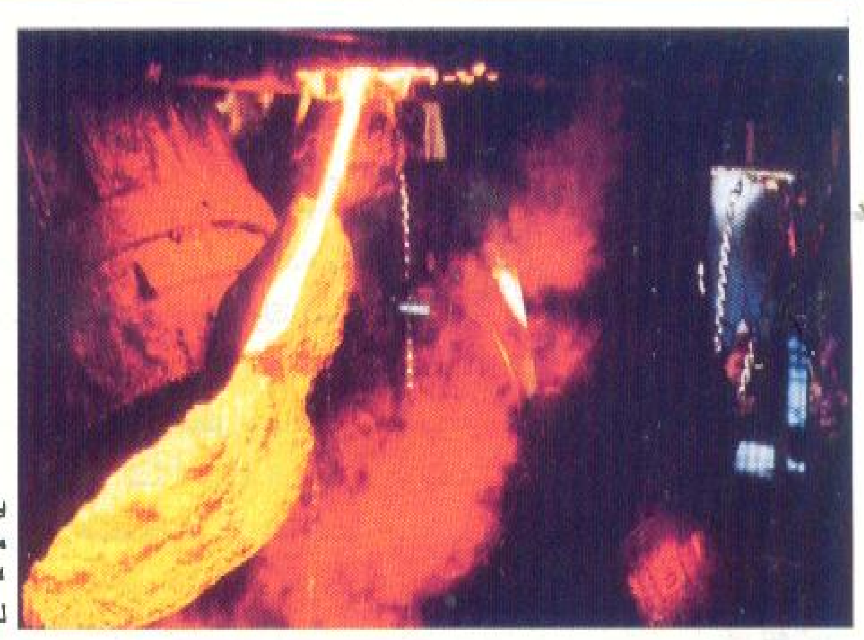
ولكى نفسر هـذه المنحنيـات ، علينـا أن نتسـاءل عـن نـوع هوائيـات الإرسـال التـى تستطيع بث موجات كهرومغناطيسية من الجسم الساخن . وحيـث أن الأطـوال الموجيـة المعنية قصيرة جدًا ؛ فإن تردد الشحنات المتذبذبة لابد أن يكون كبيرًا جدًا . فعند طـول موجى مقداره 1000 nm مثلاً يكون لدينا ؛

$$\text{التردد} = f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^{8}\ \text{m/s}}{10^{-6}\ \text{m}} = 3\times10^{14}\ \text{Hz}$$



شكل 6–26:
إشعاع الجسم الأسود . درجـات الحـرارة المذكورة بغرض المقارنة تناظر ما يلـى : 6000 k (سطح الشمـس) ، 4000 k (قوس كربونـى) ، 3000 k (مصبـاح تنجستين ساخن جدًا) .

لاحظ مدى ارتفاع هذا التردد . إن الشحنات قـادرة على التذبـذب بـهذه السـرعة فـى هوائيـات ذات أبعـاد ذريـة فحسـب . ونتيجـة لذلـك فلنـا أن نتوقـع انبعـاث الإشعـاع الكهرومغناطيسى من الشحنات المهتزة داخل الذرات والجزيئات المكونة للجسم الساخن .



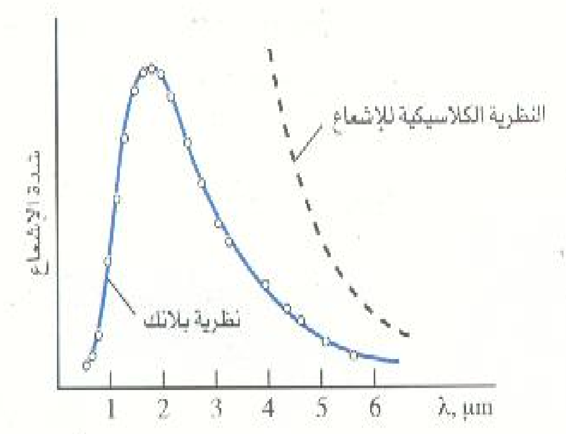
يشع الصلب المنصهر الطاقة بمعدلات مرتفعة ، مما يشكل مثالاً حيًا على قانون T^4 الذى يسمى قانون ستيفان ــ بولتزمان للإشعاع .

ونستطيع افتراض العديد من النماذج التى تمثل هذه المتذبذبات الذرية أو الجزيئية فلو كان الجسم مكونًا ، مثلاً ، من جزيئات قطبية ثنائية الذرات ، فإن الجزئ المهتز يمكن تمثيله بالصورة الموضحة فى الشكل 7–26 ، حيث ترتبط الذرتان معًا بقوة تشبه الياى ، وحيث أن الجزئ قطبى ، فإن ذرتيه تحملان شحنات تهتز على هوائى وتبعث من ثم إشعاعًا كهرومغناطيسيًا تردده f_0 ، وهو التردد الطبيعى لذبذبة نظام الياى (الزنبرك) الجزيئى . إن هذا ـ على الأقل ـ هو التصور الذى اهتدى إليه بلانك ومعاصروه .

على أنه قد اتضح أن جميع نظريات الإشعاع المبنية على هذا النموذج ، قد فشلت فى وصف إشعاع الجسم الأسود على نحو صحيح ؛ فكانت النظريات قادرة على التنبؤ بالمنحنيات الموضحة فى الشكل 6–26 عند الأطوال الموجية الطويلة فحسب ، فى حين أنها أعطت تنبؤات خاطئة تمامًا عند الأطوال الموجية القصيرة . ويعود الفضل إلى بلانك الذى اكتشف كيفية تعديل النظرية حتى تتفق مع التجربة . وإذا كان التعديل الذى أدخله مفهومًا بسهولة إلا أن هناك صعوبة فى تبريره . والحق أن المبرر الوحيد هو أن التعديل يفضى إلى الإجابة الصحيحة . وسنتناول الآن ما ذهب إليه للحصول على اتفاق بين النظرية والتجربة .

إن سعة اهتزاز نظام متذبذب ، كما نعلم ، تعتمد على طاقة ذلك النظام وعلى الرغم من أن تردد الاهتزازات هو f_0 دائمًا ، إلا أن سعة الاهتزازة تتزايد عند زيادة الطاقة . وطبقًا لما كان سائدًا من مفاهيم فى زمن بلانك ، فإن المهتز قد يكون لديه أى قدر من الطاقة فى مدى متصل من القيم .

شكل 7–26:
لقد كان الاعتقاد السائد قبل عام 1900 ، أن الجزيئات القطبية تتصرف مثل هوائى الراديو وتبعث موجات كهرومغناطيسية عندما تهتز .



شكل 8-26:
طيف إشعاع جسم أسود عند درجة حرارة مقدارها $T = 1600$ k . والدوائر تمثل البيانات المعملية ، أما النظرية الكلاسيكية للإشعاع (ويمثلها الخط المتقطع) فهي تقترب من البيانات المعملية عند الأطوال الموجية الطويلة ، وتفشل تمامًا في تفسير الانخفاض الذي يتم عند الأطوال الموجية القصيرة . وتتفق نظرية بلانك (المنحنى المتصل) التي تفترض وجود طاقات مكماة للجزيئات المهتزة ، مع السلوك المشاهد عملية ، بشكل ملحوظ .

ولما كان هذا الفرض يؤدي إلى تضارب مع التجربة ، فإن بلانك أثار سؤالاً بدأه بقوله « ماذا لو ؟ » . ثم قرر دون أدنى تبرير ، أن يعتبر أن المهتزات يمكنها أن تتخذ قيمًا محددة فقط للطاقة :

يستطيع مهتز تردده f_0 أن يتذبذب بحيث تكون طاقاته hf_0 ، $2hf_0$ ، $3hf_0$ ، . . . . ، nhf_0 ، فقط . وأية قيم أخرى للطاقة لن تكون ممكنة .

والمقدار h وهو ثابت التناسب ، قد أصبح معروفًا باسم **ثابت بلانك** . وقد وجد بلانك أنه بهذا الفرض قادر على الوصول إلى اتفاق ممتاز مع الطيف الملاحظ عمليًا لإشعاع الأجسام الساخنة (بالشكل 8-26) عندما تكون قيمة h هي :

$$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

لقد كان فرض بلانك في الحقيقة مدهشًا . إذ إنه كان يعني **تكمية** الطاقات المسموح للمهتز أن يتخذها . ولم يظهر إلى الوجود قبل بلانك مفهوم أن الطاقة تأتي على هيئة « قطع » أو **كمات** quanta بدلاً من أن يكون من الممكن تناولها بأية مقدار نشاء ، بل ولم تكن هناك أية خبرات في التعامل مع نظم ميكانيكية من شأنها إثارة أية أسباب للشك في هذا .

ولكي ندرك السبب في أن تكمية الطاقة لا تدرك بسهولة في المعمل علينا أن نفحص اهتزاز البندول . إن طاقته تعطى بالكمية mgH ، حيث H هي أعلى وضع رأسي له . . وتنص فكرة بلانك على أن طاقات البندول يمكن أن توجد فقط على هيئة مضاعفات صحيحة للكم (الكمة) الأساسي hf_0 . ولكي ندرك معنى هذا سنعتبر بندولاً تردده الطبيعي f_0 مقداره 1 Hz ، وأن كتلة الثقل المتصل به هي 100 g . والارتفاعات التي يستطيع البندول الوصول إليها هي :

$$H_1 = \frac{hf_0}{mg} = \frac{(6.6 \times 10^{-34}\ \text{J.s})(1\ \text{s}^{-1})}{(0.10\ \text{kg})(9.8\ \text{ms}^{-2})} = 6.7 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

أو $H_2 = 2H_1 = 13 \times 10^{-34}$ m أو $H_3 = 3H_1 = 20 \times 10^{-34}$ m وهلم جرًا ، أي أنه لا يمكن أن نجد ارتفاعًا أقصى للاهتزازة ذا قيمة بين القيم المذكورة .

يلاحظ أن الفرق بين ارتفاعين متعاقبين مسموح بهما للاهتزازة هو نحو 10^{-33} m

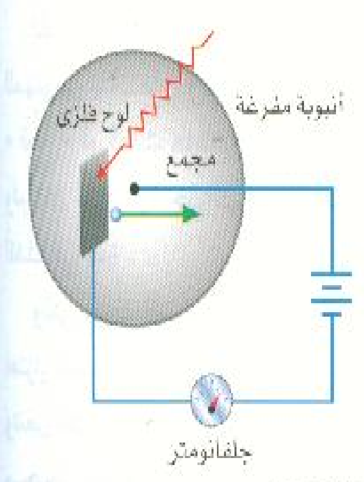
فحسب ، حسبما تنبأ بلانك . وفى المقابل ، فإن قطر ذرة ما نحو 10^{-10} m وقطر النواة الذرية نحو 10^{-14} m. والفجوة بين الارتفاعات المسموح بها أصغر كثيرًا جدًا من أن تقاس والواقع أن هذه هى حالة كل أمثلة الاهتزازات الشائع التعامل معها فى المعمل ، ولذلك لا نستطيع أن نشاهد تأثيرات الطاقات المكماة عندما نتعامل مع نظم مهتزة ذات أبعاد كبيرة (أبعاد معملية) .

وهكذا واجه بلانك موقفًا مربكًا ، فقد كان يستطيع الوصول إلى نظرية مناسبة تفسر إشعاع الجسم الساخن شريطة أن يكون راغبًا فى تبنى الفرض المذكور سابقًا . وقد اتضح أن الاختبار المعملى لهذه النظرية ، بالنسبة لنظم متذبذبة أخرى ، مستحيل تمامًا . ولذلك اعتبرها بلانك ومعاصروه ـ فى ذلك الوقت ـ نتيجة مثيرة ، ولكن صلاحيتها مشكوك فيها . على أننا سوف نرى لاحقًا أنها نظرية صحيحة وعلى أقصى قدر من الأهمية .

26-8 كيف استخدم أينشتين مفهوم بلانك ؟

لم تمض أكثر من خمس سنوات على اكتشاف بلانك ، حتى أثبت أينشتين أن هناك ظاهرة طبيعية أخرى تنطوى على نفس ثابت بلانك ، h .فحين كان عاكفًا على تفسير نتائج تجربة أجراها هينريش هيرتز لأول مرة ، قام أينشتين بافتراض أن الضوء يتمتع بخواص الجسيمات مثلما أن له خواص الموجات . وقد أصبح فرض أينشتين ـ الذى تحقق فيما بعد ـ جزءًا متممًا للفيزياء الحديثة .

ثم اكتشف هيرتز فى عام 1887 (وهو نفسه الذى تمكن من توليد واكتشاف أول موجات لاسلكية) أن الضوء قادر على اقتلاع إلكترونات من لوح فلزى وقد أصبحنا نعرف الآن أن ما حدث هو ظاهرة عامة : **تستطيع الطاقة الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية القصيرة ، إذا أسقطت على جسم صلب ، أن تجعل هذا الجسم يبعث إلكترونات من سطحه** . وسميت هذه الظاهرة **بالأثر الكهروضوئى** كما سميت الإلكترونات المنبعثة **بالإلكترونات الضوئية** .



شكل 9-26:
عندما يرتطم الضوء باللوح الفلزى ، فإن الإلكترونات تنبعث منه .

ويوضح الشكل 9-26 تجربة لمشاهدة الأثر الكهروضوئى ، حيث يتم وضع لوح فلزى داخل أنبوبة تفريغ مسدودة بإحكام ، ويتصل بهذا اللوح سلك صغير يسمى المجمِّع . (ويطلق على هذه المجموعة خلية ضوئية) . ثم وصلت هذه العناصر فى دائرة تضم بطارية وجلفانومتر كما فى الشكل . وعندما تكون الأنبوبة مغطاة بحيث لا ينفذ إليها أى ضوء ، فإن التيار المار عبر الجلفانومتر يكون صفرًا ؛ لأن ذلك الجزء من الدائرة فيما بين اللوح والمجمع داخل الأنبوبة يفتقر إلى الاتصال لأن الحيز المفرغ ذو مقاومة لانهائية بالضرورة .

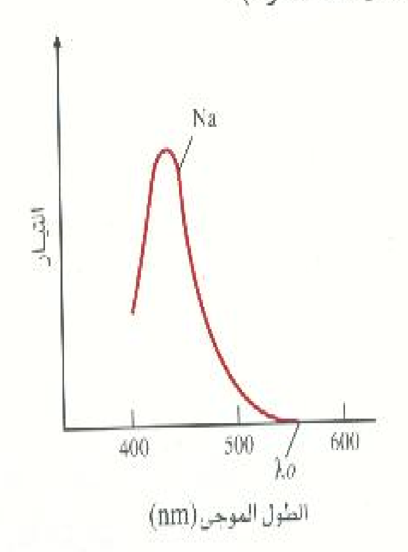
عند سقوط ضوء ذى طول موجى قصير على اللوح ، فإن مؤشر الجلفانومتر يأخذ فى الانحراف ، حيث يدل اتجاه مرور التيار على أن الإلكترونات تغادر اللوح الفلزى متجهة نحو المجمِّع . وقد يخمن البعض أن الضوء قد قام بتسخين اللوح ، وأنه حين صار ساخنًا بدرجة كافية لدرجة أن الإلكترونات ذات الطاقة الحرارية المرتفعة قد تمكنت من الهروب منه على أن الحقيقة ليست كذلك ، فقد أوضحت التجارب الدقيقة

أنه مهما كان الضوء ضعيفًا ، ومهما كان اللوح الفلزى ضخمًا ، فإن تيارًا من الإلكترونات سينبعث من اللوح فى نفس اللحظة التى يسقط فيها الضوء عليه . أى أنها ليست بحاجة لأى تسخين .



يعتبر مقياس التعرض للضوء والآلة الحاسبة ، أمثلة لأجهزة يعتمد عملها على الأثر الكهروضوئى .

ثم لوحظ بعد ذلك ، إنه بالنسبة لمصدر ضوئى معين ، يتناسب عدد الإلكترونات المنبعثة من لوح فلزى مع شدة الضوء (أى مع الطاقة الصادرة لوحدة المساحات فى الثانية) وعندما يكون جهد البطارية كبيرًا بما يكفى لاجتذاب كل الإلكترونات المنبعثة نحو المجمع ، فإن التيار المار بالجلفانومتر سيتناسب طرديًا مع شدة الضوء . (ولهذا السبب بالذات تستخدم الخلية الكهروضوئية لقياس شدة الضوء) .



شكل 10-26:
يتغير التيار المار فى الدائرة المذكورة فى الشكل 9-26 مع الطول الموجى . كما هو موضح بالنسبة لفلز الصوديوم . ما هو معنى قيمة λ_0 المشار إليها بالشكل ؟

يوضح الشكل 10-26 سمة أكثر إبهارًا لهذه الظاهرة . افترض أن الطول الموجى للحزمة الضوئية قابل للتغيير ، بينما تظل شدة الضوء ثابتة ، وأن التيار المار فى الدائرة المبينة فى الشكل 9-26 يمكن تسجيله عند سقوط حزمة ضوئية ذات طول موجى متغير

على لوح الخلية الكهروضوئية . لقد وجد أن ذلك التيار يتغير مع تغير الطول الموجي بالصورة المبينة في الشكل 10-26 . وهناك منحنيات مماثلة لألواح مصنوعة من مواد أخرى ، وإن كانت قيم λ_0 تختلف باختلاف المواد ، و λ_0 هو الطول الموجي الذي يصبح التيار المار في الدائرة عنده صفرًا .

إن أكثر سمات هذه المنحنيات إبهارًا بالفعل ، هي أنه لن تنبعث إلكترونات على الإطلاق إذا زاد الطول الموجي للضوء عن λ_0 وهو ما يطلق عليه **الطول الموجي الكهروضوئي المُشرفي** فمهما بلغت شدة الضوء فلن تنبعث إلكترونات إذا كان الطول الموجي لذلك الضوء أطول ولو بقدر طفيف عن λ_0 . كما أنه مهما كان الضوء ضعيفًا فإن الإلكترونات ستنبعث إذا كان الطول الموجي أقصر من λ_0 ، وبمجرد أن يسقط الضوء على اللوح . وتعتمد هذه القيمة الخاصة للطول الموجي λ_0 والتي يبدأ عندها انبعاث الإلكترونات على المادة التي صنع منها اللوح .

وهناك تجربة أخرى ، تتضمن نفس الدائرة المبينة في الشكل 9-26 ، ويمكن الحصول منها على المزيد من البيانات المهمة ؛ حيث توجه حزمة ضوئية ذات طول موجي معلوم وشدة معروفة نحو اللوح ، ثم تقاس طاقة أسرع الإلكترونات المنبعثة من اللوح . ويتم هذا باستخدام مصدر متغير الجهد بدلاً من البطارية على أن يكون قطباه معكوسين ولأن المجمع قد أصبح الآن سالبًا بدلاً من أن يكون موجبًا ، فهو يتنافر مع الإلكترونات الضوئية ؛ مما يجعل التيار المار في الدائرة يهبط إلى الصفر عندما يصل الجهد العكسي إلى قيمة كبيرة بما يكفي . وعند الجهد V_0 (**جهد الإيقاف**) يكون التيار صفرًا ، وحينئذ أيضًا يكون الشغل الذي يبذله أسرع الإلكترونات الضوئية عندما ينتقل من اللوح إلى المجمع هو eV_0 وذلك لأن الإلكترون يتحرك عبر فرق للجهد مقدارها V_0 . ولابد لهذا الشغل أن يكون مساويًا لطاقة حزمة أكثر الإلكترونات الضوئية طاقة . وعلى ذلك نستطيع تعيين طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية ، بواسطة قياس جهد الإيقاف V_0 :

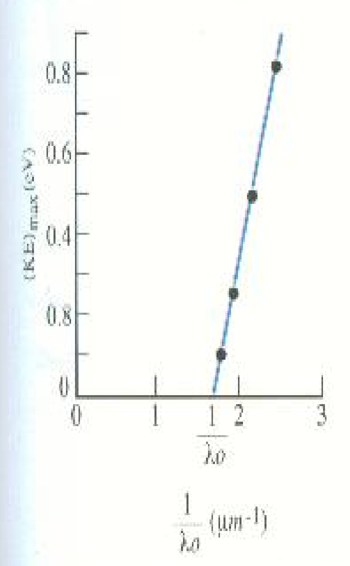
$$(\mathrm{KE})_{\max} = eV_0$$

وتتبدى لنا نتيجة مهمة عندما نقيس V_0 المناظرة لأطوال موجية ساقطة مختلفة فعندما نرسم العلاقة بين $(\mathrm{KE})_{\max}$ مع $1/\lambda$ ، تكون النتيجة خطًا مستقيمًا ، كما هو موضح بالشكل 11-26 . أضف إلى ذلك ، أن قيمة λ التي تصبح عندها $(\mathrm{KE})_{\max}$ صفرًا هي الطول الموجي المشرفي λ_0 . وتصبح معادلة الخط المستقيم $\lambda = mx + b$ ، في هذه الحالة :

$$(\mathrm{KE})_{\max} = \frac{A}{\lambda} - B \qquad (26\text{-}4)$$

حيث تحل $1/\lambda$ محل x ويحل A محل m ، ويحل الجزء المقطوع $-B$ محل b . ويختلف الثابت B من مادة لأخرى ، أما A وهو يمثل ميل الخط المستقيم ، فيكون ثابتًا لجميع المواد وتصل قيمته إلى 2.0×10^{-25} J.m .

ولقد بذلت محاولات عديدة لتفسير كل هذه المشاهدات بدلالة الطبيعة الموجية للضوء ، إلا إنها قد باءت جميعها بالفشل ، حيث قامت عقبتان أساسيتان أمام أى تفسير موجي .



شكل 11-26:
تتناسب طاقة الإلكترون عكسيًا مع الطول الموجي . ويمثل هذا الخط البياني الخاص فلز الصوديوم .

1 كيف يمكن تصور موجات تؤدى إلى وجود طول موجى مشرفى ؟ إن الضوء الذى طوله الموجى λ أقل قليلاً من λ_0 ، لن يختلف بشكل ملموس عن الضوء الذى طوله الموجى λ أكبر قليلاً من λ_0 . ومع ذلك فأطوال الموجات الأقصر قليلاً من λ_0 تجعل الإلكترونات تنبعث ، فى حين أن تلك الأطول قليلاً من λ_0 لا تفعل ذلك .

2 كيف يتسنى حتى لأضعف حزمة ضوء ممكنة أن تجعل الإلكترونات تنبعث بمجرد تسليط الضوء على الفلز ؟ إن طاقة الضوء عندئذ ستبدو كما لو تركزت عند إلكترون لحظيًا وجعلته يفلت من أسر الجسم الصلب .

وهكذا بات واضحًا أن توجهًا جديدًا لابد من اتباعه لتفسير الأثر الكهروضوئى . وقد خطا أينشتين هذه الخطوة الجزئية الخلاقة ، وأمسك بأفكار بلانك حول طاقات المهتز الخاصة . وقد فكر أينشتين فى الأمر ووجد أنه لو كان على المهتزات الذرية داخل جسم ساخن أن تبعث إشعاعًا بالطريقة التى تصورها بلانك ، فإن الطاقة لابد أن تنبعث على صورة دفقات أو حزم . وحيث أن الموجات الكهرومغناطيسية تحمل طاقة ، فإن المهتز الذى يبعث ضوءًا ، مثلاً ، لابد أن يرسل طاقة بالطبع . على أنه إذا كان المهتز يستطيع اتخاذ قيم محددة معينة للطاقة فحسب ، لذا فهو لن يلقى بالطاقة بشكل مستمر . إذ إن عليه أن يقذف بالطاقة على شكل دفقات مقدارها hf_0 لأنه يمثل التباعد بين قيم الطاقة المسموح بها للمهتز .

ولكى نكون محددين ، افترض أن طاقة المهتز $37hf_0$ ، فإذا فقد قدرًا من الطاقة عندما يبعث بإشعاع ما ، فإن طاقته ستصبح $36hf_0$ وليس أى شىء آخر فيما بين هاتين القيمتين ؛ وذلك طبعًا لأن طاقات المهتز مكماة . ولكنه إذ يفعل ذلك ، فإنه يكون قد تخلص من نبضة ضوء أو إشعاع آخر طاقتها hf_0 . ويطلق على نبضة الطاقة الكهرومغناطيسية هذه **كمة ضوء أو فوتون** . وهكذا يتضح لنا أن هناك بعض التبرير للاعتقاد بأن حزمة الضوء تتكون من سلسلة من حزم الطاقة التى تسمى فوتونات . وتعمل هذه الفوتونات كجسيمات للضوء تنتقل بسرعة مقدارها c ، حاملة طاقة مقدارها hf .

وهكذا وضع أينشتين فرضه المتعلق بطبيعة الضوء :

تتكون حزمة الضوء ذى الطول الموجى λ (والتردد $f = c/\lambda$) من تيار من الفوتونات . ويحمل كل فوتون طاقة مقدارها hf .

وسوف نرى لاحقًا كيف ترتبط طاقة الفوتون بتركيب الذرات والجزيئات . دعنا الآن نطبق نموذج أينشتين للحزمة الضوئية على الأثر الكهروضوئى .

إذا كان الضوء مكونًا من فوتونات ، فإنها سوف تتصادم مع الإلكترونات المنفردة مثلما ترتطم حزمة الضوء بمادة ما . وعندما تكون طاقة الفوتون أكبر من الطاقة اللازمة لانتزاع إلكترون وتحريره من المادة ، فإن الإلكترونات تنبعث فى نفس اللحظة التى يسقط فيها الضوء على المادة . أما إذا كانت طاقة الفوتون أقل من تلك القيمة ، فلن ينبعث أى إلكترون مهما كانت شدة الضوء الساقط على الفلز . (وفرصة ارتطام فوتونين بإلكترون واحد فى نفس اللحظة تكاد تكون صفرًا) . ويتضح لنا من أول وهلة أن الطاقة

الجدول 1-26 :

دالة الشغل والطول الموجى الكهروضوئى الشرفى لبعض المواد المختارة

المادة	دالة الشغل (ϕ)		الطول الموجى الشرفى	
	(eV)	10^{-19} J	nm	منطقة الطيف
روبيديوم	2.10	3.36	592	المرئى
سيزيوم	2.14	3.42	581	المرئى
بوتاسيوم	2.30	3.68	541	المرئى
ألمونيوم	4.28	6.85	290	فوق البنفسجى
تنجستين	4.55	7.28	273	فوق البنفسجى
نحاس	4.65	7.44	267	فوق البنفسجى
ذهب	5.10	8.18	244	فوق البنفسجى
بلاتين	5.65	9.04	220	فوق البنفسجى

اللازمة لانتزاع إلكترون من اللوح مساوية تمامًا لطاقة فوتون ذى طول موجى مشرفى . وعلى ذلك يكون أدنى شغل يلزم لانتزاع الإلكترون وتحريره من الجسم الصلب هو

$$\text{الحد الأدنى للشغل} = \phi = \frac{hc}{\lambda_0} = hf_0$$

حيث يمثل هذا الحد الأدنى للشغل بالرمز ϕ ويسمى **دالة الشغل** لمادة معينة وقد أوردنا فى الجدول 1-26 قيمًا لدالة الشغل لقليل من الفلزات . ويلاحظ أن الضوء فوق البنفسجى هو الذى يلزم فى العديد من الحالات لانتزاع الإلكترونات من الفلزات .

وعندما يكون للفوتون طاقة أكبر من ϕ ، أى عندما يكون λ أصغر من λ_0 فإن الإلكترون لن يقتلع من اللوح فحسب وإنما سيمتلك فائضًا من الطاقة أيضًا . أى أن جزءًا من طاقة الفوتون hc/λ سوف يفقد لبذل الشغل ϕ ، أو لتحرير الإلكترون أما الباقى فيظهر على صورة طاقة حركة للإلكترون . وعلى ذلك يمكننا بالنسبة لطاقات غير نسبوية ، أن نكتب ما يلى ،

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - \phi \tag{26-5}$$

وهى **المعادلة الكهروضوئية** .

إن لمعظم الإلكترونات الضوئية المنبعثة طاقة حركة أقل من $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max}$ ، الواردة فى المعادلة (5-26) لأنها تتعرض لتصادمات عديدة قبل أن تغادر المادة . وهكذا فإن $\frac{1}{2}mv^2$ فى المعادلة (5-26) هى نفسها $(KE)_{\max}$ فى المعادلة (4-26) . ونجد عند مقارنة المعادلة (5-26) مع المعادلة (4-26) أن A فى المعادلة (4-26) لابد أن تكون hc . وتشير التجارب إلى أن القيمة العددية للثابت A هى بالفعل hc وكتأكيد أخير

للمعادلة (5–26) فإن دالة الشغل ϕ كما تتحدد بمساواتها بالقيمة العملية للثابت B في المعادلة (4–26) هي نفس دالة الشغل التي يتم تعيينها من تجارب مختلفة تمامًا .

وهكذا نستطيع أن نستنتج أن الإلكترونات الضوئية تنبعث من مادة ما إذا كان الفوتون الساقط على المادة له طاقة كافية لطرد ذلك الإلكترون . وطاقة الفوتون hf وهي نفسها hc/λ . والفوتون الذي طوله الموجي الشرفي λ_0 ، ستكون طاقته hc/λ_0 ، وهي تساوي دالة الشغل ϕ . ومثل هذا الفوتون قادر بالكاد على إطلاق إلكترونات ضوئية . أما الفوتونات التي لها أطوال موجية أقصر من λ_0 فلديها طاقة أكثر مما يكفي لإطلاق إلكترونات ضوئية ، ولذا يظهر فائض الطاقة على صورة طاقة حركة للإلكترون الضوئي .

مثال توضيحي 4–26

ما هي طاقة فوتون في حزمة إشعاع تحت الأحمر طوله الموجي 1240 nm ؟

استدلال منطقي :

$$\text{طاقة الفوتون} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626\times10^{-34})(3.00\times10^{8}\ \text{m/s})}{1240\times10^{-9}\ \text{m}}$$

$$= 1.602\times10^{-19}\ \text{J} = 1.00\ \text{eV}$$

حيث قمنا باستعمال معامل التحويل $1\ \text{eV} = 1.602\times10^{-19}\ \text{J}$

ومن المناسب تذكر هذه النتيجة : **إن الفوتونات المكونة لإشعاع طوله الموجي 1240 nm ستكون طاقتها 1 eV** . والضوء الذي طوله الموجي ، مثلاً ، 1240/4 nm ستكون طاقة فوتوناته 4×1 eV . ■

مثال توضيحي 5–26

أوجد طاقة الفوتون في كل من الحالات الآتية : (أ) موجات لاسلكية (راديو) طولها الموجي $\lambda = 100$ m ؛ (ب) ضوء أخضر له $\lambda = 550$ nm ؛ (جـ) أشعة إكس حيث $\lambda = 0.200$ nm .

استدلال منطقي : باستخدام نتيجة المثال التوضيحي رقم 4–26 نجد أن :

(أ) $$\frac{1240\times10^{-9}\ \text{m}}{100\ \text{m}}\times1\ \text{eV} = 1.24\times10^{-8}\ \text{eV}$$

(ب) $$\frac{1240}{550\ \text{nm}}\times1\ \text{eV} = 2.25\ \text{eV}$$

(جـ) $$\frac{1240}{0.200\ \text{nm}}\times1\ \text{eV} = 6200\ \text{eV}$$

لاحظ الطاقات المرتفعة لفوتونات أشعة إكس .

تمرين : القدرة المصاحبة لحزمة ليزر ($\lambda = 633$ nm) هي 2.0 mW ؛ أي إنها تحمل

طاقة مقدارها 2.0 mJ عند أية نقطة فى الثانية . ما عدد الفوتونات التى تمر بنقطة ما فى مسار الحزمة كل ثانية ؟ **الإجابة** : 6.4×10^{15} .

مثال 3-26

عندما يسقط ضوء طوله الموجى 500 nm على سطح معين فإن جهد الإيقاف للإلكترونات الضوئية هو 0.44 V . ما هى دالة الشغل لهذه المادة ؟ وما هو أطول طول موجى يستطيع إخراج إلكترونات من سطح تلك المادة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يمثل جهد الإيقاف ؟

الإجابة : تنطلق الإلكترونات الضوئية من السطح بطاقة فائضة عن أدنى حد للطاقة المطلوبة . وجهد الإيقاف V_0 هو الجهد المثبط ، اللازم لإيقاف أكثر الإلكترونات طاقة حتى لا يصل إلى المجمِّع . وعلى هذا فالمقدار eV_0 يساوى $(KE)_{max}$ للإلكترونات .

سؤال : كيف ترتبط V_0 بدالة الشغل ؟

الإجابة : دالة الشغل ϕ هى أدنى طاقة لازمة لإطلاق إلكترون . وتتحول طاقة الفوتون الفائضة إلى طاقة حركة KE للإلكترون . وهذا ما توضحه المعادلة 5-26 :

$$(\frac{1}{2}mv^2)_{max} = eV_0 = \frac{hc}{\lambda} - \phi$$

سؤال : ما هو الشرط الذى يحدد قيمة أطول طول موجى يكفى لإخراج إلكترون ؟

الإجابة : الشرط هو أن تكون طاقة الفوتون قادرة على إخراج إلكترون بدون فائض KE .

الحل والمناقشة :

$$\phi = \frac{hc}{\lambda} - eV_0$$

$$= \frac{(6.63\times10^{-34}\ J.s)(3\times10^{8}\ m/s)}{5\times10^{-7}\ m} - (1.6\times10^{-19}\ C)(0.44\ V)$$

$$= 3.27\times10^{-19}\ J = 2.05\ eV$$

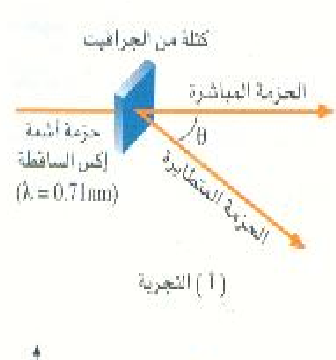
ومن ثم ،

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\phi}$$

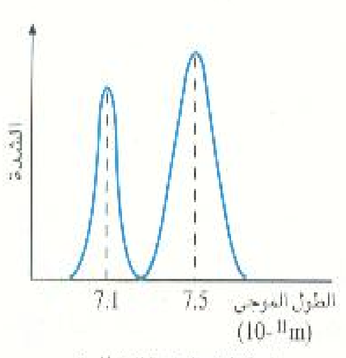
$$= \frac{(6.63\times10^{-34}\ J.s)(3\times10^{8}\ m/s)}{3.27\times10^{-19}\ J} = 608\ nm$$

وإذا رجعنا إلى الجدول 1-26 لاستنتجنا أن المادة هى الروبيديوم .

26-9 أثر كومتون : كمية تحرك الفوتون



(أ) التجربة



(ب) طيف الحزمة المتطايرة
(θ=135°)

شكل 12-26:
أثر كومتون . عندما تتطاير أشعة إكس ($\lambda = 0.071$ nm ، فى هذه الحالة) ، فإن الحزمة المتطايرة ستكون لها مركبتان . إحداهما لها نفس الطول الموجي الذى للحزمة الأصلية والثانية لها طول موجي أطول .

حيث أن كلاً من الضوء وأشعة إكس من الموجات الكهرومغناطيسية ، فلابد أن ينطبق مفهوم الفوتون على أشعة إكس أيضًا . وقد قدم أ.هـ. كومتون عام 1923 البرهان المباشر على وجود فوتون أشعة إكس لأول مرة . فقد لاحظ أنه عندما تسقط حزمة وحيدة اللون من أشعة إكس على كتلة مصنوعة من الجرافيت ، فإن نوعين من أشعة إكس يتطايران من تلك الكتلة (الشكل 12-26) ، وكان الطول الموجي لأحد النوعين هو نفس الطول الموجي للإشعاع الساقط ، أما النوع الآخر فكان طوله الموجي أطول من الذى للأشعة الساقطة . ويمكن تصوير ذلك الجزء من الأطوال الموجية الذى لا يتغير على أنه قد نشأ على النحو التالي : المجال الكهربي المهتز فى الحزمة الساقطة يجعل شحنات الذرة تهتز بنفس تردد الموجة . وتعمل هذه الشحنات المهتزة كالهوائي الذى يبث موجات لها نفس التردد والطول الموجي . ولذلك تكون أشعة إكس المتطايرة هى موجات أعيد إشعاعها من الشحنات الذرية المهتزة .

وكما قلنا من قبل ، فبالإضافة إلى هذه الحزمة من أشعة إكس المتطايرة ، هناك نوع آخر من أشعة إكس المتطايرة ، وهو النوع الذى طوله الموجي أطول قليلاً . والطول الموجي الدقيق لهذه الأشعة يعتمد على الزاوية θ التى تتطاير عندها الأشعة بطريقة محكمة وبسيطة نسبيًا .

ولم يتيسر تفسير لوجود هذه الأشعة باستخدام الصورة الموجية لأشعة إكس . إلا أن كومتون وبيتر ديباى قدما تفسيرًا بسيطًا ، كل على حدة وبشكل مستقل عن أحدهما الآخر . لقد افترضا أن التطاير الأساسي كان بمثابة تصادمات مرنة بين فوتونات أشعة إكس . والكترونات ذرات الجرافيت ، بحيث تكون طاقة حركة وكمية تحرك نظام الإلكترون - فوتون محفوظتين . وحيث أن طاقة ربط الإلكترون داخل الجرافيت مهملة بالنسبة لطاقة فوتون أشعة إكس ، فإن الإلكترون يتصرف - أساسًا - كجسيم حر عندما يرتطم به فوتون .

علينا - إذا أردنا تحليل تصادم الفوتون مع الإلكترون - أن نتصور كيفية التعبير عن كمية تحرك الفوتون . لقد أصبح لدينا - فعلاً - معلومتان حول الفوتون : (1) حيث أن الفوتونات تمثل ضوءًا ، فلابد أن سرعتها هى c ، (2) تعتمد طاقات الفوتونات على أطوالها الموجية ، $E = hc/\lambda$. وقد يكون من المغرى أن نتذكر التعريف الكلاسيكي لكمية التحرك وهو mv ، ثم نكتب $p = mc$ بالنسبة للفوتون ، ولكن المشكلة أننا لا نملك قيمة محددة لكتلة الفوتون . ونستطيع - فى الواقع - أن نثبت أن **كتلة السكون للفوتون لابد وأن تكون صفرًا !** فحيث أن الفوتون ينتقل فى الفراغ بسرعة مقدارها c ، فإنه يكون لدينا ،

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-1}} = \frac{m_0}{0}$$

فإذا كان للمقدار m_0 أى قيمة خلاف الصفر ، لكانت m لا نهائية . وحيث أن $E = mc^2$ ، فإن الكتلة اللانهائية للفوتون ستقتضى طاقة لا نهائية له ، وهذا - كما نعلم - غير صحيح . ولابد أن نستنتج إذن أن $m_0 = 0$. فإذا بدا لك هذا الأمر غريبًا فتذكر أن **الفوتون لا يكون أبدًا ساكنًا** . إنه ينبعث ويمتص بسرعة الضوء . **إن فوتونًا يتحرك عبر الفراغ لن ينتقل مطلقًا بسرعة بخلاف c** . والكتلة الوحيدة التى لمثل هذا الجسيم سيكون مردها إلى طاقة حركته ولذلك فإن

$$E_{\text{photon}} = (m - m_0)\,c^2 = mc^2 = \frac{hc}{\lambda}$$

ومن هذه العلاقة نستطيع أن نحدد تعبيرًا لكمية تحرك الفوتون ، يكافئ المقدار mc :

$$\text{كمية تحرك الفوتون} = p = mc = \frac{mc^2}{c} = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \qquad (26\text{–}6)$$

وفى حالة تطاير (استطارة) كومتون ، يقدم الفوتون بعضًا من طاقته وكمية تحركه إلى الإلكترون الذى ارتطم به . وبما أن هاتين الخاصيتين تنطويان على الطول الموجى فإن فوتون أشعة إكس المتطاير لابد أن يكون طوله الموجى مختلفًا عن الطول الموجى لفوتون أشعة إكس الساقط . وإذا ما طبقنا مبادئ حفظ طاقة الحركة وكمية التحرك ، باستخدام العلاقتين $E = hc/\lambda$ و $p = h/\lambda$ للفوتون فسنصل إلى ما حصل عليه كومتون وديباى للتغير فى الطول الموجى :

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) \qquad (26\text{–}7)$$

حيث m_e هى كتلة السكون للإلكترون و θ هى الزاوية التى ترصد عندها أشعة إكس المتطايرة بالنسبة للحزمة الساقطة (الشكل 13–26) . ويلاحظ أن التغير فى الطول الموجى يعتمد **فقط** على الزاوية التى تتطاير بها أشعة إكس . أما المقدار $h/m_e c$ فهو ثابت وله أبعاد طول ويعرف باسم **الطول الموجى لكومتون** بالنسبة للإلكترون ، وقيمته 2.43×10^{-12} m . وتتراوح قيمة $\Delta\lambda$ من 0 عند $\theta = 0°$ إلى $2h/m_e c$ عند $\theta = 180°$.

ولقد وجد أن المعادلة (7–26) متفقة تمامًا مع النتائج التجريبية لكومتون واعتبر هذا تأكيدًا صارخًا للخصائص التفاعلية ذات الصفة الجسيمية للموجات الكهرومغناطيسية مع المادة .

تمرين : اثبت أن البيانات الواردة فى الشكل 12–26 تخضع للمعادلة (7–26) .

شكل 13–26:
يصطدم الفوتون بإلكترون ما فى ظاهرة كومتون بحيث تظل الطاقة وكمية التحرك محفوظتين .

الجزء الثالث : ميكانيكا الكم

26–10 الطول الموجى لدى برولى

لقد رأينا فى ما سبق أن للإشعاع الكهرومغناطيسى طبيعة مزدوجة . فهو يحمل خصائص موجية تجعله يظهر تأثيرات التداخل والحيود . كما أن له سلوك الجسيمات

كما يتضح من خواصه الفوتونية . ومن الطبيعى فى وجود هذه الثنائية أن نتكهن أن للإلكترون ، وربما جسيمات أخرى ، خواص موجية .

وبالفعل ، كان لويس دى برولى أول من اقترح ـ بجدية ـ الطبيعة المزدوجة للإلكترون . وكان من بين ما دفعه إلى اقتراحه ذلك ، النظرية الموجية لنيلز بوهر حول ذرة الهيدروجين . فقد اكتشف دى برولى عام 1923 أنه يستطيع تبرير أحد فروض بوهر الرئيسية تبريرًا منطقيًا إذا اعتبر أن للإلكترون خواص موجية . وسوف نقفز مباشرة إلى نتيجة دى برولى بدلاً من الغوص فى الأحداث التاريخية التى أدت إليها .

إن كمية تحرك الفوتون ـ كما رأينا ـ هى h/c (المعادلة 6-26) ولذلك فإن طوله الموجى هو $\lambda = h/p_{\text{photon}}$. وبالمثل ، فإذا كان لجسيم ما خواص موجية ، فقد يرتبط



إذا اعتبرنا أن هذين الجسيمين لهما تقريبًا نفس الكثافة فأيهما يُتوقع أن يُظهر آثارًا موجية أقوى ، لو أنهما يتحركان بنفس السرعة ؟ (الواقع أن كليهما سيسلك سلوكًا كلاسيكيًا) .

الطول الموجى المصاحب له وكذا كمية تحركه بمعادلة شبيهة بهذه . وقد افترض دى برولى أن للجسيمات خواص موجية وأن طولها الموجى هو

$$\text{الطول الموجى لدى برولى} = \lambda = \frac{h}{p} \qquad (26\text{-}8)$$

حيث h هو ثابت بلانك و p كمية تحرك الجسيم المعنى .

وقد قام البرهان على صحة افتراض دى برولى تجريبيًا بطريق الصدفة على أيدى س.ج دافيسون و ل.هـ .جيرمر عام 1927 . لقد كانا يبحثان فى تطاير حزمة من الإلكترونات عند سقوطها على بلورة فلزية (النيكل) . ويصور الشكل 14-26 رسمًا تخطيطيًا للجهاز الذى استخدماه وكان بداخل غرفة مفرغة . وكانت التجربة تبدأ بتعجيل حزمة من الإلكترونات عن طريق إكسابها طاقة عند عبورها فى فرق جهد كهربى V . ثم كانت القياسات تجرى لمعرفة عدد الإلكترونات المتطايرة من سطح البلورة عندما تسقط عليها الحزمة . وكانت النتيجة غير المتوقعة لهذه التجربة أن الإلكترونات

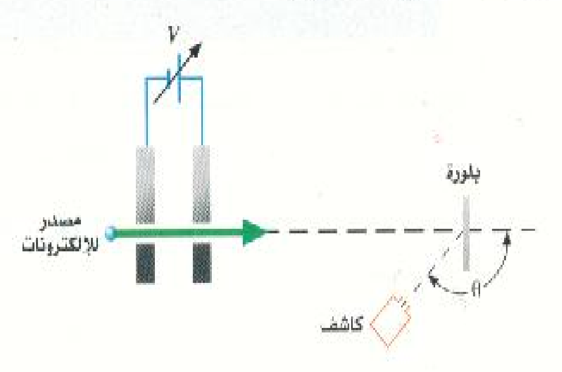
كانت تتطاير بقوة عند زوايا خاصة معينة فقط . وحينئذ لم يتمكن دافيسون وجيرمر من تفسير ذلك .

ثم تقدم بعضهم باقتراح إلى الباحثين بأن تلك النتيجة قد تكون برهانًا لأفكار دى بـرولى . وعندئذ عكف الاثنان على مزيد من القياسات مستخدمين بلورات تم توجيهها بشكل صحيح لمعرفة ما إذا كانت الزوايا المحددة بكل وضوح للإلكترونات المتطايرة قابلة للتفسير فى ضوء ظواهر التداخل التى تنشأ عن المسافات المنتظمة بين صفوف الذرات داخل البلورة والتى تؤدى دور محزوز للحيود ذى نوع خاص وجدير بالذكر هنا أن الفيزيائيين و.هـ. براج وابنه و.ل.براج قد وضعا نظرية حيود أشعة إكس بواسطة البلورات عام 1913 ؛ وكان ذلك أساسًا لعلم البلورات باستخدام أشعة إكس والذى يرجع إليه الفضل فى معرفة تركيب البلورات والجزيئات المعقدة مثل جزئ DNA . وقانون براج لحيود أشعة إكس مطابق من حيث الشكل لمعادلة المحزوز التى استخدمناها فى الفصل الرابع والعشرين .

إذا كانت المسافة بين مستويات بلورة ما هى d ، وكان الطول الموجى هو λ ، فإن انعكاسًا قويًا (تداخل بناء) لابد أن يقع عند الزوايا التى تعطى بالعلاقة

$$m\lambda = 2d \sin \theta_m \qquad m = 1, 2, 3, \ldots\ldots$$

حيث θ فى هذه الحالة هى الزاوية بين الحزمة المتطايرة ومستوى التشتت (التطاير) ، والمسافة d فى معظم البلورات من رتبة 0.1 nm . ولعلك تذكر أن ظواهر التداخل تتجلى فقط عندما يكون الطول الموجى للضوء الساقط له نفس تباعد المحزوز تقريبًا . وعندئذ لابد لحدوث حيود بالبلورة أن يكون الطول الموجى 0.1 nm بالتقريب ، وهو ما يقع فى منطقة أشعة إكس من الطيف الكهرومغناطيسى .



شكل 14-26:
قاس دافيسون وجيرمر أعداد الإلكترونات المنعكسة من البلورة عند زوايا مختلفة .

وحيث أن دافيسون وجيرمر كانا يعرفنا قيمة d وقاسا مواقع الانعكاس القوى θ للإلكترونات فإنهما تمكنا من حساب λ . ومن ناحية أخرى ، حيث أن $\frac{1}{2}mv^2 = Ve$ ، فإنهما استطاعا حساب كمية تحرك الإلكترونات :

$$p = mv = \sqrt{2Vme}$$

حيث V هو فرق الجهد الكهربى الذى تعجل من خلاله حزمة الإلكترونات ، ومن هذه القيمة تمكن دافيسون وجيرمر من إيجاد الطول الموجى لدى برولى مرة ثانية ، $\lambda = h/p$ ؛

ووجدا أن قيمتي λ متطابقتان . وبعبارة أخرى ، تنعكس الإلكترونات بنفس الطريقة التي لابد أن تنعكس بها موجات دى برولى المصاحبة لها . وهذا هو البرهان المباشر لفكرة دى برولى من أن للإلكترونات خواص موجية .

وبمرور السنين اتضح أن النيوترونات والبروتونات والذرات والجزيئات مثلها مثل الجسيمات الأخرى تبدى نفس الظواهر الموجية التى للإلكترونات . ولذلك فنحن مضطرون للاعتقاد بأن الجسيمات المتحركة عبر حيز ما ، تتصرف كموجات طولها الموجى h/p ، حيث h هو ثابت بلانك و p هو كمية تحرك الجسيم المعنى . وسنناقش فى المثال التوضيحى 7–26 السبب فى أن هذا السلوك لم تتم ملاحظته من قبل للجسيمات الماكروسكوبية (الكبيرة) .

مثال توضيحى 6–26

تصل سرعة الإلكترون أحيانًا داخل أنبوبة التليفزيون إلى 5×10^7 m/s . ما هو الطول الموجى لدى برولى المصاحب لهذا الإلكترون ، إذا تغاضينا عن تأثيرات النسبية ؟

استدلال منطقى : إذا عوضنا من هذه الأرقام فى المعادلة 8–26 لوجدنا أن $\lambda = 0.145 \times 10^{-10}$ m . والطول الموجى المصاحب للإلكترون يقع فى الظاهر فى مدى أشعة إكس (ولا نعنى بهذا الإشارة إلى أن موجات دى برولى ترتبط بالموجات الكهرومغناطيسية لأنها بالتأكيد ليست موجات كهرومغناطيسية من حيث طبيعتها . وسنتناول أمورًا أكثر من هذه حول الموضوع فى القسم التالى .) ■

مثال توضيحى 7–26

صف نمط الحيود الذى قد يحدث إذا أطلقت رصاصة (كتلتها m = 0.1 g و $v = 200$ m/s) عبر فتحة عرضها 0.20 cm .

استدلال منطقى : يعطى الطول الموجى لموجة دى برولى المصاحبة للطلقة من العلاقة :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{(10^{-4})(2 \times 10^{2})} = 3.3 \times 10^{-32}\ \text{m}$$

ونعلم أن ظواهر الحيود والتداخل تصبح كبيرة إذا كانت λ مقارنة بعرض الفتحة أو التباعد (راجع القسم 8–24) ، ولذلك نستطيع استنتاج أن ظواهر التداخل مهملة . ولبيان ذلك بوضوح ، سنقوم بإيجاد الزاوية θ بين الحزمة المارة مباشرة فى خط مستقيم والحد الأدنى للحيود الذى يحدث عند (المعادلة 5–24) .

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{\text{slit width}} = 1.6 \times 10^{-29}$$

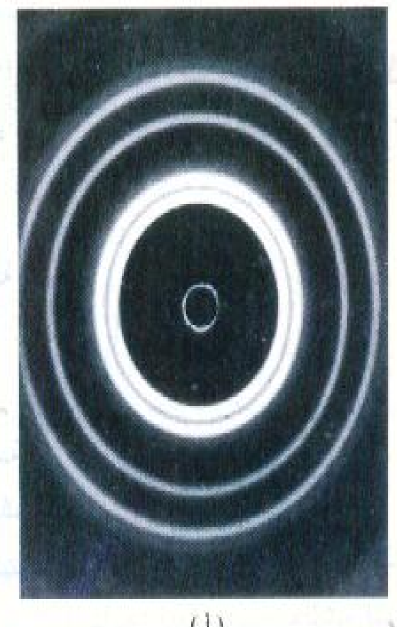
وبعبارة أخرى ، ستكون زوايا الحيود كلها من الصغر بحيث تنتقل جميع الجسيمات

فى خط مستقيم لتمر من الفتحة . تنتج إذن حركة فى خط مستقيم وتصبح الظواهر الموجية غير ملحوظة . ويحدث هذا الموقف دائمًا فى التجارب الماكروسكوبية ، ولهذا السبب فإن ظواهر دى برولى الموجية غير ملحوظة بالنسبة لحركة الجسيمات الماكروسكوبية .

26-11 الميكانيكا الموجية فى مقابل الميكانيكا الكلاسيكية

أدى اكتشاف الخواص الموجية للجسيمات إلى نتائج خطيرة بالنسبة لتفسير حركة الجسيمات وكذلك بالنسبة للميكانيكا بشكل عام . ولابد أن نبحث فى الظروف التى تجعل الطبيعة الموجية للجسيمات من الأهمية بمكان بحيث تجعلنا نعدل من الوصف الكلاسيكى (التقليدى) لسلوك الجسيمات . ويمكننا فى هذا السبيل - أن نعول على معارفنا السابقة حول السلوك الموجى كالحيود والتداخل .

يدل تفسير نمط حيود الضوء باستخدام مفهوم الفوتون ، على أن النمط يمثل توزيع مسارات الفوتونات المارة عبر الفتحة . ولذلك تكون مناطق شدة الإضاءة القصوى هى حيث تذهب معظم الفوتونات . يرينا الشكل 15-26 (أ) نمط تداخل حزمة من أشعة إكس المارة من غشاء من الألمونيوم ، أما الشكل 15-26 (ب) فيبين النمط الذى تكون عندما أطلقت إلكترونات عبر نفس الغشاء . ويشير التشابه بين نمطى حيود أشعة إكس والإلكترونات إلى وجود ظروف متشابهة بالنسبة لموجات دى برولى فإذا استخدمنا الأطوال الموجية لدى برولى فى حالة الإلكترونات ، لتمكننا من التنبؤ بالموقع الذى يحظى بأكبر احتمال لأن ترتطم به إلكترونات فيما وراء فتحة ضيقة فى الحائل .



(أ)

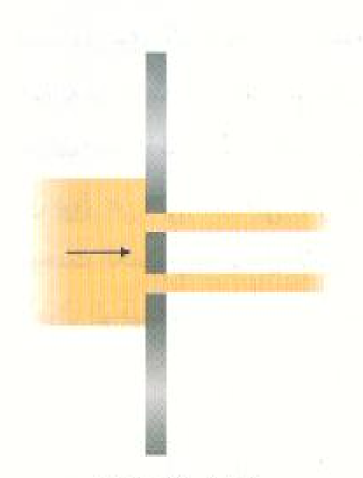


(ب)

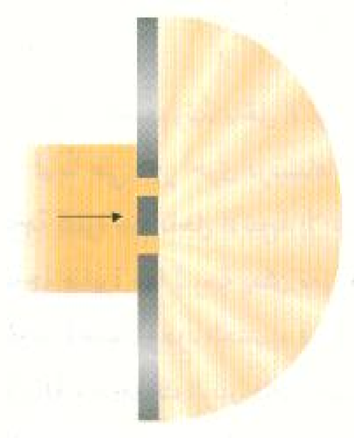
شكل 15-26:
نمط الحيود الناتج من حزمة من (أ) أشعة إكس و (ب) الإلكترونات الساقطة على هدف من غشاء من الألمونيوم .

سنعتبر الآن الحالتين المبينتين فى الشكل 16-26 . لو أن موجة نفذت من حاجز به فتحتان أوسع كثيرًا من الطول الموجى فإن الموقف سيكون كما هو موضح فى الشكل 16-26 (أ) حيث يظهر ظلان محددان لحواف الفتحتين . وقد رأينا فى المثال

التوضيحى رقم 7-26 أن هذا هو ما يحدث مع الجسيمات الماكروسكوبية . إلا أن الجسيمات ذات الكتل الصغيرة للغاية (كالإلكترونات مثلاً) لها كمية تحرك صغيرة جدًا حتى وإن كانت سرعاتها مرتفعة جدًا . ويعنى هذا أن أطوال دى برولى الموجية يمكن مضاهاتها بسهولة بأبعاد التجربة الماكروسكوبية ولذلك قد تصير خواصها الموجية ملحوظة . والإلكترونات النافذة عبر نفس الفتحتين يمكنهما إحداث توزيع كالذى يبينه الشكل 16-26 (ب) ، حيث التحكم فى مساراتها يكون بالطبيعة الموجية لها أكثر مما هو بالميكانيكا الكلاسيكية للجسيمات . وبالرجوع إلى سؤالنا الأساسى حول متى تفشل الميكانيكا الكلاسيكية ، فيمكننا النص على ما يلى :



(أ) عرض الفتحة $>> \lambda$



(ب) λ مقارنة لأبعاد الفتحة

شكل 16-26:
(أ) عندما يكون الطول الموجى المصاحب لجسيم ما أصغر بكثير من عرض الفتحة ، فإن صورًا واضحة ومحددة للفتحة ستتكون بواسطة الجسيمات النافذة . (ب) أما عندما تقترب λ من عرض الفتحة فإن ظواهر تداخل نموذجية يمكن رؤيتها فى توزيع الجسيمات الخارجة .

تصبح الميكانيكا الكلاسيكية عاجزة عندما يكون طول دى برولى الموجى للجسيم مقاربًا أو أصغر من أصغر أبعاد التجربة .

إن احتمال حدوث هذا الموقف هو فقط عند معالجة جسيمات ذرية وما دون الذرية . وتسود الظواهر الموجية ـ بشكل خاص ـ سلوك الإلكترونات داخل الذرات وعندئذ علينا أن نستبدل بالميكانيكا الكلاسيكية ، **الميكانيكا الموجية** . ولأسباب سنلتقى بها بعد قليل كثيرًا ما يشار إلى الميكانيكا الموجية باسم **ميكانيكا الكم** .

وما إن اقترح دى برولى وجود الطبيعة الموجية للجسيمات حتى بادر العالم الألمانى إدوين شرودنجر إلى وضع معادلة تصف الخواص الموجية للجسيمات . لقد أصبحت **معادلة شرودنجر** ـ وهى شبيهة بالمعادلة التى تستخدم لوصف سلوك الموجات الكهرومغناطيسية ـ تشكل حجر الأساس لميكانيكا الكم . وإذا كانت المبادئ النيوتونية (الكلاسيكية) لازالت قادرة على حل معظم المسائل الماكروسكوبية ، إلا أن الظواهر النسبوية تصبح مهمة عندما تقترب سرعات الجسيم من سرعة الضوء فحسب أو عندما يستلزم الأمر وجود نتائج دقيقة جدًا . وتحل ميكانيكا الكم محل الميكانيكا النيوتونية عندما تتناول أبعادًا مقاربة للأطوال الموجية فحسب . وسنرى فى الفصل التالى أن ميكانيكا الكم لابد وأن تستخدم فى تفسير ما يجرى داخل الذرة نفسها .

26-12 الرنين فى موجات دى برولى : الحالات المستقرة

عندما تناولنا الموجات الميكانيكية مثل تلك التى تحدث فى الأوتار والموجات الصوتية داخل الأنابيب ، فقد اكتشفنا الأهمية الكبيرة لرنين الموجات ، وتظل الأهمية قائمة أيضًا بالنسبة لموجات دى برولى . وسنقوم الآن بمعالجة موقف بسيط يتضمن حدوث رنين لموجات دى برولى .

القضية الأولى : جسيم داخل أنبوبة

اعتبر أن لديك جسيمًا كتلته m داخل أنبوبة ضيقة طولها L وطرفاها مغلقان كما هو واضح من الشكل 17-26 (أ) . وإذا كان هذا الجسيم سيتصرف كموجة فلابد أن

موجة دى برولى المصاحبة لـه ستحدث رنينًا فى الأنبوبة ، كما يتضح من الأجزاء السفلية من الشكل ، ويطلق على مثل هذا الرنين **حالة مستقرة** . وحيث أن الجسيم لا يستطيع مغادرة الأنبوبة ، فلابد أن طرفيها يمثلان عقدتين . (تذكر أن سعات موجات دى برولى هى التى تدلنا على أكثر الأماكن احتمالاً لأن يوجد فيه الجسيم) . وهكذا سيحدث الجسيم رنينًا داخل الأنبوبة عندما يكون لموجة دى برولى المصاحبة للجسيم الأطوال الموجية التالية (تذكر أن المسافة بين عقدتين هو $\frac{1}{2}\lambda$) :

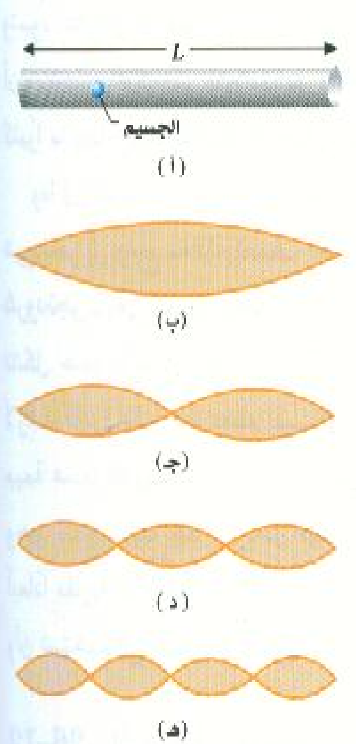
$$L = \frac{1}{2}\lambda_1 \qquad L = 2\left(\frac{1}{2}\lambda_2\right) \qquad L = 3\left(\frac{1}{2}\lambda_3\right) \qquad \ldots$$

أو بشكل عام ، فإن الحالة المستقرة لجسيم ما ستحدث عندما :

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad \text{حيث} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots.$$

ولن يحدث الجسيم رنينًا داخل الأنبوبة إلا إذا كان له أحد هذه الأطوال الموجية الرنينية .

قياسًا على صور أخرى درسناها للرنين نستطيع أن نستنبط ما يلى : لا تتنامى موجة كبيرة جدًا داخل الأنبوبة إلا عند رنين موجة فقط ، فيما عدا ذلك تكون سعة الموجة صغيرة جدًا لدرجة يمكن معها إهمالها . وحيث أن سعة موجة دى برولى بمثابة مقياس لاحتمال وجود الجسيم فى مكان ما ، فإننا نتوقع أن يتواجد الجسيم فى الأنبوبة عند حدوث الرنين فقط . أضف إلى ذلك أن الجسيم سيتواجد بأكبر قدر من الاحتمالات حيث يكون لموجات الرنين المبينة فى الشكل 17-26 أقصى سعة ، أى عند بطون الموجات . . أما حيث توجد العقد ـ وهذا الأمر أكثر إبهارًا ـ فإن الجسيم لن يتواجد مطلقًا . وقبل أن نسترسل فى فحص هذه النتيجة لأبعد من هذا ، سنقوم بفحص طاقة الجسيم داخل الأنبوبة .



شكل 17-26:
الحالات المستقرة لجسيم داخل أنبوبة . تشير سعة الموجة عند موقع معين إلى الاحتمال النسبى لوجود الجسيم عند ذلك الموقع .

ليس للجسيم سوى طاقة حركة ، $\frac{1}{2}mv^2$. (نعتبر الآن ظروفًا غير نسبوية) . وسنطلق على طاقة الجسيم E_n عندما يكون الجسيم فى الحالة الرنينية التى رقمها n أى ،

$$E_n = \frac{1}{2}mv_n^2$$

إلا أن كمية التحرك p هى mv ولذلك يمكننا كتابة التعبير السابق هكذا ؛

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m}$$

ولكن الطول الموجى لدى برولى المصاحب للجسيم هو $\lambda_n = h/p_n$ ولذلك ،

$$E_n = \frac{h^2}{2m\lambda_n^2}$$

وفى النهاية ، فقد رأينا أن $\lambda_n = 2L/n$ ، ومن ثم

$$E_n = \frac{n^2h^2}{8mL^2} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \ldots.. \qquad (26\text{-}9)$$



وهكذا نصل إلى النتيجة المدهشة وهى أنه لو كان على الجسيم أن يتواجد داخل الأنبوبة فلابد أن يكون له إحدى قيم الطاقة المعطاة بالمعادلة (26-9) وعندئذ يقال أن طاقة الجسيم **مكماة quantized** ولهذا السبب يشار إلى الميكانيكا الموجية عادة باسم ميكانيكا الكم . ولن يكون للجسيم أى قيم للطاقة خلاف هذه القيم . وتتناقض هذه النتيجة المبهرة مع الميكانيكا الكلاسيكية ، التى تتنبأ بأن الجسيم داخل الأنبوبة قادر على إتخاذ أى وكل قيم طاقة الحركة بما فيها الصفر . ألا يجعلنا هذا التناقض بين نتائج الميكانيكا الموجية وخبراتنا المعروفة نكفر بالميكانيكا الموجية ؟ الإجابة هى « لا » وذلك لسبب سنشرحه الآن .

دعنا نقم بحساب طاقات الرنين لحُبيبة غبار دقيقة ($m = 1 \times 10^{-15}$ kg) داخل أنبوبة طولها 50 cm :

$$E_n = \frac{n^2h^2}{8mL^2} = (2 \times 10^{-52}\ \text{J})\,(n^2)$$

أى أن طاقات الحُبيبة هى 2×10^{-52} J و $4(2 \times 10^{-52})$ J و $9(2 \times 10^{-52})$ J وهلم جرًا . يلاحظ مدى ضآلة هذه الطاقات والفرق فيما بينها . إن الفجوة بين قيمتين هى 2×10^{-52} J فحسب ، وهى من الصغر بالمقارنة مع الطاقة الحرارية لجسيم غازى (10^{-21} J) لدرجة أننا لن نستطيع معها أن نحكم إن كانت هناك فجوة للطاقة أم لا . بل إن هذا الأمر أكثر وضوحًا بالنسبة لجسيم ذى كتلة أكبر . ونستنتج من ثم أنه بالنسبة لجميع الجسيمات العادية داخل أنابيب ذات حجم مرئى ، فإن طاقة الجسيم تكون متصلة بالضرورة ؛ فالتجربة العملية لا تسمح لنا برؤية الطبيعة الكمية للطاقة كما تتنبأ بها الميكانيكا الموجية .

ويصير الموقف مختلفًا تمامًا عند معالجة أنابيب ذات أحجام ذرية . افترض أن لدينا إلكترونًا ($m = 9 \times 10^{-31}$ kg) داخل أنبوبة لا يزيد طولها عن 2×10^{-10} m ، وإذن

$$E_n = n^2\,(1.5 \times 10^{-18}\ \text{J}) = 9n^2\text{eV}$$

وهذه الطاقة من الكبر بحيث يصبح من السهل قياس فجوات الطاقة . ونستنتج من ثم ، أن الطبيعة الموجية للجسيمات والسمة الكمية لطاقاتها تكون ذات شأن فى النظم ذات الأحجام الذرية .

القضية الثانية : المتذبذب التوافقى

يطلق على كتلة m تهتز تحت تأثير قوة زنبرك تتبع قانون هوك **متذبذبًا توافقيًا** ويمكننا ـ كتقريب أولى ـ أن نعتبر الذرات المهتزة فى الجزيئات ، متذبذبات توافقية . ويتشابه المتذبذب التوافقى فى كثير من الوجوه مع الجسيم داخل الأنبوبة الذى عالجناه منذ قليل ، ولكن ما يعقد المشكلة هو حقيقة أن للنظام طاقة وضع متغيرة نتيجة تشوه الزنبرك . وحتى مع هذا فإن حركة النظام الرنينية يمكن إيجادها عند حل معادلة شرودنجر ـ والنتيجة النهائية لذلك الحساب ليست بالبعيدة تمامًا عن تلك التى لجسيم داخل أنبوبة . وستكون الطاقة مكماة ـ بشكل خاص ـ ولها القيم التالية :

$$E_n = (n + \frac{1}{2}) \left(\frac{h}{2\pi}\right)\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad , \qquad n = 1, 2, \ldots.$$

حيث k هو ثابت الزنبرك .

ويمكن التعبير عن هذه النتيجة بصورة مثيرة للاهتمام إذا تذكرنا أن تردد الرنين f_0 بالنسبة لكتلة معلقة عند نهاية زنبرك هو

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

وبالتعويض من هذه القيمة فى معادلة E_n نجد ،

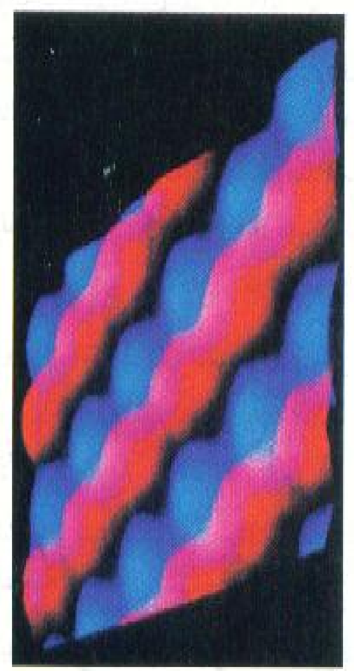
$$E_n = (n+\frac{1}{2})(hf_0) \qquad , \qquad n = 0, 1, 2, \ldots. \qquad (26\text{–}10)$$

أى أن طاقات متذبذب يخضع لقانون هوك مكماة ، والفجوات بين الطاقات المسموح بها مساوية للمقدار hf_0 .

هذه النتيجة العجيبة هى ببساطة الخاصية التى كان على بلانك أن يلصقها بالمتذبذبات حتى يتمكن من تفسير إشعاع الجسم الأسود . أى أنه بعد مرور 25 سنة على ما خمنه بلانك ، يأتى استخدام مفاهيم دى برولى الموجية ويبين السبب فى أن التخمين لابد أن يكون صحيحًا . لقد علمنا فى القسم 7–26 أن فرض بلانك لا يمكن اختباره بالنسبة لمتذبذبات ذات حجم معملى . ونرى الآن أن هذا التخمين غير القائم على دليل ، قد تمت مؤازرته بالعديد من صور نجاح النظرية الكمية . وسنكتشف المزيد من صور دعم الميكانيكا الموجية فى الفصل التالى .

26-13 مبدأ اللايقين

منذ اكتشاف الطبيعة الموجية للإلكترون والتجارب العديدة تتوالى للنظر فيما إذا كانت هناك جسيمات أخرى تسلك نفس السلوك . ودراسة الجسيمات ذات الأبعاد الذرية أو ما دون الذرية سهلة نسبيًا فيما يتعلق بالظواهر الموجية ، ولم يكتشف أى استثناء لمعادلة دى برولى للأطوال الموجية . والواقع أن استعمال الإلكترونات والنيوترونات إلى جانب أشعة إكس فى تجارب الحيود التى صممت لدراسة التركيب البلورى ، قد أصبح من الأمور الشائعة .



لقد تم التقاط الصورة لسطح بلورة أرسينيد الجاليوم باستخدام جهاز يعرف باسم الميكروسكوب النفقى الماسح . وقد استعمل تشفير لونى لتوضيح ذرات الجاليوم المنفردة باللون الأزرق وذرات الزرنيخ باللون الأحمر . وعلى الرغم من أهمية تركيب الشبيكة الذرية إلا أن الذرات المنفردة لا زالت تظهر مشوشة بدلاً من ظهورها على هيئة نقط محددة .

تؤدى الطبيعة الموجية لجميع الجسيمات إلى مبدأ فلسفى عظيم . فقد كان الجدل قائمًا بين الفلاسفة قبل هذا الاكتشاف ، حول ما إذا كان مصير الكون محددًا تمامًا أم لا . هل نستطيع ـ ولو من حيث المبدأ ـ أن نحدد موقع وسرعة وطاقة جميع الجسيمات فى الكون ثم أن نتنبأ بمجرى الأحداث المستقبلية ؟ يبدو أن الطبيعة الموجية لجميع الجسيمات تتطلب منا أن نجيب بالنفى على هذا السؤال . والواقع أن هذه الحقيقة كامنة فى مبدأ اللايقين لهايزنبرج الذى سنتولى الآن دراسته .

دعنا ننظر في البداية في كيفية تحديد موقع جسيم ما بأقصى قدر من الدقة ، فلكي نحدد الموقع لابد أن نجعل جسيمًا ثانيًا على الأقل (سنسميه الجسيم المجس) يصطدم مع الجسيم المستهدف ، ثم نسجل الزاوية التي يتطاير بها الجسيم المجس . ولكي نقلل قدر الإمكان من تأثير الجسيم المجس على موقع الجسيم المستهدف ، فإننا سنستخدم فوتونًا منفردًا طوله الموجي λ ليقوم بدور المجس . يحمل هذا الفوتون كمية تحرك مقدارها $p = h/\lambda$ وطاقة مقدارها $E = hc/\lambda$. وسنستخدم كاشفًا للجسيم (قد يكون عدسة مثلاً) يقابل زاوية مقدارها α عند الجسيم باتجاه المحور y . وعند تطاير الفوتون من على الجسيم فإنه ينقل بعضًا من كمية تحركه إلى الجسيم . وسيكتسب الفوتون خلال العملية بعضًا من المركبة x لكمية التحرك ، ولكن مركبة كمية التحرك هذه ستتخذ أقصى قيمة ممكن $\Delta p_x = p \sin \alpha$ حتى يتسنى للفوتون أن يدخل إلى العدسة ويكتشف هناك . وحيث أن كمية التحرك لابد وأن تكون محفوظة ، فإن الهدف لابد أن يكتسب مركبة x من كمية التحرك مساوية ومضادة لتلك التي اكتسبها الفوتون . وكل ما يقال الآن ، هو إنه لكي يتم اكتشاف الفوتون ، فإن كمية تحرك الهدف ستكون **لا يقينية** بالمقدار

$$\Delta p_x = p \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha$$

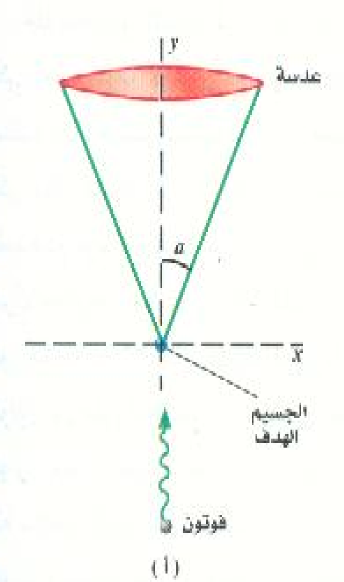
لقد درسنا في الفصل الرابع والعشرين أن ظواهر الحيود تحد من الدقة التي يمكن بها تحديد موقع مصدر نقطي . ويمكننا كتابة هذا الحد تقريبيًا على أنه $\Delta x \approx \lambda/\sin \alpha$. وعلى ذلك فإن اكتشاف الفوتون كفيل بتحديد موقع الجسيم المستهدف في حدود هذا القدر من اللايقين في الموضع فحسب . فإذا قمنا الآن بضرب قيمتي اللايقين في الموضع وكمية التحرك بالنسبة للجسيم المستهدف ، فإننا نحصل على :

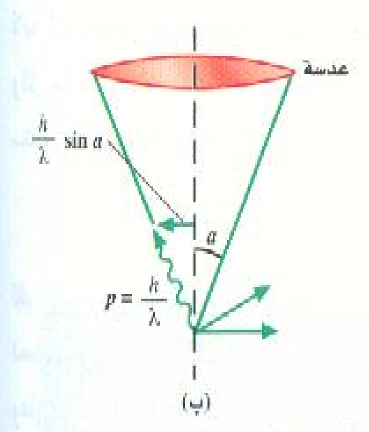
$$\Delta p_x \, \Delta x = \left(\frac{h}{\lambda} \sin \alpha\right)\left(\frac{\lambda}{\sin \alpha}\right) = h$$

وبعبارة أخرى ، فعندما نلجأ لأكثر التجارب دقة ، يمكن تخيلها ، من أجل تحديد موضع جسيم ، ونقيس في نفس الوقت كمية تحركه ، فإن حاصل ضرب مقداري اللايقين الذاتي لهاتين الكميتين لابد ـ على الأقل ـ أن يكون مساويًا لثابت بلانك . ويتضح أن هذه علاقة عامة تمامًا وهي إحدى صور مبدأ هايزنبرج للايقين .

ومن الممكن الوصول إلى صورة أخرى لمبدأ اللايقين من خلال استدلال مشابه لهذا . إذا كان اللايقين في موضع الجسيم الهدف هو $\Delta x \approx \lambda$ ، فإن الزمن الذي يستغرقه الفوتون لكي يقطع هذه المسافة $\Delta t = \lambda/c$. وتتراوح كمية الطاقة التي يمكن للجسيم الهدف أن يستقبلها من الفوتون بين الصفر وحتى قيمة قصوى تساوي طاقة الفوتون كلها hc/λ . ولذلك فإن الطاقة التي يحصل عليها الجسيم تتضمن مقدارًا من اللايقين هو $\Delta E = hc/\lambda$ ، فإذا ضربنا قيمتي اللايقين في الطاقة والزمن ، نحصل على :

$$\Delta E \Delta t = \frac{hc}{\lambda} \frac{\lambda}{c} = h$$





شكل 18-26:
(أ) فوتون ساقط على جسيم ـ هدف .
(ب) ولكى يتم اكتشاف وجود الجسيم الهدف فإن الفوتون لابد أن يخترق العدسة ، التى تقابل زاوية α عند الجسيم المستهدف . ونتيجة لذلك فإن الجسيم يمكنه أن يحصل على مركبة x لكمية التحرك تصل إلى $(h/\lambda)\sin\alpha$.

وهكذا أصبح لدينا علاقتان للاتيقين ، إحداهما تتضمن كمية التحرك والأخرى تتضمن الطاقة ، وقد اقترحتا لأول مرة من فيرنر هاينزنبرج عام 1927 . دعنا الآن نصوغ العلاقتين بصورة أكثر دقة . طبقًا لمبدأ اللايقين لهاينزنبرج فإن :

عند قياس الإحداثى x وكمية التحرك p_x لجسيم ما فى نفس اللحظة فإن ،

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \qquad (26\text{-}11)$$

حيث Δx و Δp_x هما قيمتا اللايقين فى x و p . وبالمثل ، عند قياس الطاقة E لجسيم ما فى لحظة t فإن قيمتى اللايقين ΔE و Δt ترتبطان بالعلاقة :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \qquad (26\text{-}12)$$

وسبب وضع العلامة $\geq$ إنه فى حالة أية قياسات واقعية لا مفر من إثارة اضطراب للجسيم المستهدف بدرجة أكبر من التى يحدثها قياس فوتون واحد مثالى .

وهكذا نجد أنه من المستحيل ، ولو من حيث المبدأ ، أن نعرف كل شيء عن جسم ما إذ سيكون هناك دائمًا قدر من اللايقين حول طاقته الحقيقية فى لحظة معينة ، وحول كمية تحركه الحقيقية فى موقع معين . هذه إحدى النتائج الأساسية اللازمة لمفاهيم كمات الضوء والموجات الجسيمية . من الواضح ، إذن ، إن هناك حاجة إلى صياغة جديدة لوصف الجسيمات الذرية وكمات الضوء فى حالات تكون فيها هذه الظواهر مهمة . أى أنه لابد من اللجوء إلى طرق ميكانيكا الكم أو الميكانيكا الموجية لتناول هذه الظواهر .

افترض أن هناك إلكترونًا محبوسًا داخل مكعب طول ضلعه 10^{-10} m ، وحجم هذا المكعب هو تقريبًا نفس حجم الذرة . احسب القيمة الصغرى لطاقة حركة هذا الإلكترون التى عليه أن يتخذها إذا كان مقيدًا إلى هذا الحيز . يمكنك معالجة KE كلاسيكيًا . وعلى سبيل المقارنة فإن KE للإلكترون فى ذرة الهيدروجين 13.6 eV ، فهل تتفق إجابتك معها ؟

أ

سؤال : ما هو المبدأ الذى يتطلب أن يكون للإلكترون حد أدنى من KE ؟

الإجابة : لا يوجد فى الفيزياء الكلاسيكية ما يتطلب أن تكون KE عند أية قيمة خاصة . فقد تكون صفرًا . ولكن مبدأ اللايقين يتطلب أن تصبح كمية التحرك ـ وهى مرتبطة بالطبع بطاقة الحركة KE ، متضمنة قدرًا أكبر من اللايقين كلما كان موقع الإلكترون معروفًا بدقة أكبر ولذلك لا يمكنك القول بأن p (وبالتالى KE) تساوى صفرًا تمامًا .

سؤال : ما هى العلاقة التى تعطى مقدار اللايقين فى كمية التحرك ؟

الإجابة : يجب أن تكون Δp_x أكبر من $h/4\pi\Delta x$ ، حيث Δx هو الحيز الذى ينحصر الإلكترونات بداخله . وهناك تعبيران مماثلان بالنسبة لكل من اتجاهى y و z .

سؤال : كيف لهذه العلاقة أن تحدد أن هناك قيمة صغرى لكمية التحرك ؟

الإجابة : تنص هذه العلاقة على أنه ليست هناك طريقة لمعرفة أو قياس كمية التحرك فى اتجاه يقل عن هذا اللايقين . ويمكننا من ثم القول بأن القيمة الصغرى للمقدار p_x هى

$$p_{x,\min} = \frac{h}{4\pi\,\Delta x}$$

وبالمثل بالنسبة لكل من p_y و p_z .

سؤال : ما هى العلاقة بين كمية التحرك و KE ؟

الإجابة : بالنسبة لوجهة النظر الكلاسيكية $\text{KE} = p^2/2m$ ، وفى حالة الأبعاد الثلاثة

$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2$$

سؤال : ما هى العلاقة التى أحصل عليها بالنسبة للقيمة الصغرى لطاقة الحركة KE عندما استخدم تعبير الحد الأدنى لكمية التحرك ؟

الإجابة :

$$(\text{KE})_{\min} = \frac{3p_{x,\min}^2}{2m} = \frac{3(h/4\pi\,\Delta x)^2}{2m}$$

حيث m هى كتلة السكون للإلكترون

الحل والمناقشة : إذا استخدمنا للمقدار Δx القيمة 10^{-10} m فسنجد أن

$$(\text{KE})_{\min} = \frac{3(6.63\times10^{-34}\ \text{J.s})^2}{32\pi^2(10^{-10}\ \text{m})^2(9.1\times10^{-31}\ \text{kg})}$$

$$= 4.6\times10^{-19}\ \text{J} = 2.9\ \text{eV}$$

وهذه هى نفس رتبة المقدار الخاص بطاقة الحركة KE للإلكترون فى ذرة الهيدروجين التى بمثابة مثال مختلف قليلاً لإلكترون محصور فى حيز مساوٍ تقريبًا . ومن ناحية أخرى فإلكترون الهيدروجين له أكثر من طاقة الحركة الدنيا الناتجة من التحليل السابق .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) مناط الإسناد ، (ب) مناط الإسناد ذا القصور الذاتى ، (جـ) معامل النسبية ، (د) الطول الصحيح والزمن الصحيح ، (هـ) تمديد الزمن ، (و) انكماش الطول ، (ز) كتلة السكون والكتلة الظاهرية ، (ح) العلاقة بين الكتلة والطاقة ، (ط) طاقة كتلة السكون ، (ى) ثابت بلانك ، (ك) الأثر الكهروضوئى ، (ل) الطول الموجى المشرفى ، (م) دالة الشغل ، (ن) الفوتون ، (س) الطول الموجى لكومتون ، (ع) الطول الموجى لدى برولى ، (ف) الحالة المستقرة ، (ص) الطاقة المكماة ، (ق) مبدأ اللايقين .

2 أن تذكر فرضى النسبية الأساسيين .

3 أن تذكر النتائج التى تمخضت عنها نظرية النسبية من حيث ما يلى : أقصى سرعة للأشياء ، الأحداث المتزامنة ، تمديد

الزمن ، انكماش الطول ، تغير الكتلة مع السرعة ، طاقة الحركة ، والتحويل بين الكتلة والطاقـة . وأن تصل إلى إجابات مسائل بسيطة تتضمن هذه النتائج .

4 أن تذكر الشروط التى عندها لابد من استخدام معادلات النسبية لوصف كتلة الجسيم وطاقة حركته .

5 أن تحسب قيم الطاقة المسموح بها (طبقًا لبلانك) بالنسبة لمتذبذب تردده الطبيعى معروف إذا كان ثـابت بلانـك معروفـًا . وأن تشرح لماذا تبدو طاقة البندول متصلة .

6 أن ترسم منحنى بيانيًا لشدة الإشعاع مع λ بالنسبة لجسم ساخن وأن تبين كيفية تغير هذا المنحنى مع درجة الحرارة .

7 أن تصف الأثر الكهروضوئى وتبين ما المقصود بالمُشْرف الكهروضوئى . وأن تذكر ما هى طاقة الفوتون بدلالة طولـه الموجـى . وأن تشرح كيف ينطبق مفهوم الفوتون على الأثر الكهروضوئى . وأن تحسب الطول الموجى الشرفـى بمعرفـة دالـة الشغـل . وأن تستخدم معادلة الأثر الكهروضوئى فى حالات بسيطة .

8 أن تصف أثر كومتون وتشرح كيف يمكن تفسيره بدلالة تطاير الفوتون .

9 أن تذكر العلاقة بين كمية تحرك فوتون و (أ) طاقته ، (ب) طوله الموجى و (جـ) تردده .

10 أن تذكر الطول الموجى لدى برولى بالنسبة لجسيم معروف الكتلة ويتحرك بسـرعة معلومـة . وأن تذكـر السبب فـى سهولة ملاحظة الخواص الموجية للإلكترونات ، بينما لا تلاحظ الخواص الموجية لكرة التنس مثلاً .

11 أن تصف تجربة دافيسون وجيرمر وتشرح كيف إنها حققت وجود موجات دى برولى .

12 أن تصف الحالات المستقرة لجسيم داخل أنبوبة ، وأن تفصّل التنبؤات الجديدة للنظرية الموجية من حيث الموضع والطاقة . وأن تشرح السبب فى أن هذه التنبؤات لا تخرق التجارب المعروفة .

13 أن تشرح الظروف التى عندها لابد من إحلال ميكانيكا الكم محل الميكانيكا النيوتونية الكلاسيكية . وأن تصل إلى اسـتدلال منطقى مستنبط من ظواهر التداخل التى لوحظت بالنسبة للضوء ، وأن تشرح سبب فشل الميكانيكا النيوتونية تحت هذه الظروف .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية

ثابت بلانك (h)

$$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

الطول الموجى لكومتون (λ_c)

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2.43 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

مناط الإسناد ذو القصور الذاتى

مناط الإسناد ذو القصور الذاتى هو الذى ينطبق عليه قانون نيوتـن للقصـور الذاتـى ، وهـو يعنـى بـالضرورة منـاط الإسـناد غـير المتحرك بتسارع (بعجلة) .

فرضا نظرية النسبية

1 سرعة الضوء ثابتة بالنسبة لجميع الراصدين بغض النظر عن حركتهم النسبية بالنسبة لمصدر الضوء .

2 لا يمكن قياس السرعات المطلقة أبدًا . والسرعات المنسوبة إلى مناط معين هى فقط التى يمكن قياسها .

نتائج فرضى النسبية

1 قوانين الطبيعة ثابتة لا تتغير فى جميع مناطات الإسناد ذات القصور الذاتى .

2 الأحداث التى ترصد على أنها متزامنة فى مناط ذى قصور ذاتى قد لا تعتبر متزامنة فى أى مناط ذى قصور ذاتى آخر يتحرك بالنسبة لأول .

3 لا يمكن تعجيل جسم ما ليصل إلى سرعة الضوء فى الفراغ c .

4 لا يمكن أن تنتقل طاقة ما بسرعة أكبر من c .

القياسات الصحيحة للطول والزمن

هى تلك التى تكون فيها أجهزة القياس ساكنة بالنسبة للأجسام أو الأحداث المراد قياسها .

العلاقة بين القياسات الصحيحة وغير الصحيحة

الزمن : لو أن راصدًا يقيس الفترة الزمنية t بين حدثين يقعان فى مناط ذى قصور ذاتى يتحرك بسرعة مقدارها v بالنسبة له أو لها ؛ فإن هذه الفترة الزمنية ستكون أطول من الفترة الزمنية الصحيحة t_0 ، التى يقيسها شخص ساكن بالنسبة للأحداث ويرتبط الزمنان المقاسان بالعلاقة :

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

الطول : لو أن راصدًا يقيس مسافة d بين نقطتين تتحركان بسرعة مقدارها v بالنسبة له أو لها ، فإن هذه المسافة ستكون أقصر من المسافة الصحيحة d_0 التى يقيسها شخص ساكن بالنسبة للنقطتين . وترتبط المسافتان المقاستان (بفرض أن v والنقطتين على خط واحد) بالعلاقة التالية :

$$d = d_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

خلاصة

1 إن استخدام لفظ « الصحيح » لا يعنى قياسًا أكثر دقة من قياس « غير صحيح » إذا يفترض أن كلاً من القياسين قد تم بشكل « سليم » .

2 يطلق على المعامل الذى لا أبعاد له $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$ ، معامل النسبية . وقيمته العددية واحد تقريبًا إلا إذا اقتربت v من c .

3 تتفق القياسات التى يجريها راصدون يتحرك بعضهم بالنسبة لبعض حول قيم سرعتهم النسبية v وسرعة الضوء c .

الكتلة النسبوية

إذا كانت كتلة جسم ما ساكن هى m_0 ، فإنه سيكتسب كتلة m أكبر عندما يرصد وهو يتحرك بسرعة v . ويربط بين m و m_0 العلاقة التالية :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

خلاصة

1 إن هذه الزيادة فى الكتلة تقتضى ببساطة زيادة القصور الذاتى للجسم عندما يتحرك بسرعة كبيرة فعندما تقترب v من c فإن الأمر يتطلب قوة أكبر فأكبر لتغير سرعة ذلك الجسم .

الطاقة النسبوية

ترتبط طاقة جسم ما مع كتلته بالعلاقة $E = mc^2$ ، حيث تعتمد m على مقدار سرعة الجسم كما ذكرنا آنفا . وتكون طاقة الجسم الساكن هى $E_0 = m_0c^2$ وتعطى طاقة حركة الجسم بالعلاقة

$$\text{KE} = (m - m_0)c^2$$

خلاصة

1 عندما تكون v أقل كثيرًا من c فإن معادلة طاقة الحركة تختزل إلى المعادلة الكلاسيكية $KE = \frac{1}{2}mv^2$.

2 إن أية عملية من شأنها تغيير طاقة جسم ما بمقدار ΔE ، لابد وأن تكون مصحوبة بتغير فى الكتلة Δm ، تعطى بالعلاقة :

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$$

طاقة الفوتون

تبلغ طاقة فوتون من ضوء طوله الموجى λ (وتردده f) ما يلى :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hf$$

الأثر الكهروضوئى

تنبعث الإلكترونات من سطح فلز ما إذا سلط على ذلك السطح ضوء طوله الموجى أقصر من طول موجى مشرفى λ_0 ، يعتمد على مادة ذلك السطح .

دالة الشغل (ϕ)

هى الطاقة التى تربط الإلكترون بالسطح ، وهى تساوى طاقة فوتون من الضوء الذى له طول موجى مشرفى λ_0 :

$$\phi = \frac{hc}{\lambda_0}$$

جهد الإيقاف (V_0)

V_0 هو جهد الإبطاء اللازم لإيقاف أكثر الإلكترونات الضوئية طاقة والتى تنبعث نتيجة تسليط ضوء طوله الموجى أقصر من λ_0 .

المعادلة الكهروضوئية

eV_0 تساوى القيمة القصوى لطاقة حركة الإلكترونات الضوئية المنبعثة .

$$eV_0 = (\frac{1}{2}mv^2)_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - \phi$$

كمية تحرك الفوتون

كمية تحرك فوتون ما هى

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

والعلاقة بين طاقة الفوتونات وكمية تحركها هى

$$p = \frac{E}{c}$$

خلاصة

1 للفوتونات دائمًا سرعة ثابتة هى c ولذلك فخواصها غير كلاسيكية بطبعها وبالنسبة للفوتون فليس هناك معنى لمفهوم كتلة السكون .

تطاير كومتون

عندما ترتطم أشعة إكس بسطح ما ، فإن الطول الموجى للجزء الذى يتطاير منها بزاوية مقدارها θ بالنسبة لاتجاه السقوط ، يتزايد بمقدار ،

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$

وتسمى الكمية $h/m_e c$ بالطول الموجي لكومتون الخاص بالإلكترون . ويعزى الازدياد في الطول الموجي إلى التشتت المرن لفوتون أشعة إكس إلكترون والذي يفقد الفوتون من خلاله جزءًا من كمية تحركه .

الطول الموجي لدى برولي

للجسيم الذي كمية تحرك p طول موجي اقترحه دى برولي ويعطى بالمعادلة

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

خلاصة

1 حيث أن للثابت h قيمة غاية في الصغر ، لذا فالطبيعة الموجية للجسيمات المادية لا يمكن رصدها إلا إذا كانت كتلة الجسيم صغيرة للغاية .

2 تصبح الميكانيكا الكلاسيكية غير صالحة عندما يصير الطول الموجي لدى برولي مساويًا أو أكبر من أصغر أبعاد تجربة ما .

مبدأ اللايقين

هناك حدود لازمة للدقة التي نعرف بها كلاً من موضع وكمية تحرك جسيم ما . ويخضع حاصل ضرب مقداري اللايقين بالضرورة للمتباينة التالية :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

وهناك نتيجة لازمة لهذا المبدأ ، وهي علاقة مماثلة بين مقداري اللايقين في قياس الطاقة والفترة الزمنية اللازمة لقياس الطاقة :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

خلاصة

1 توضح هاتان المتباينتان أنه كلما ارتفعت دقة قياس إحدى الكميتين ، كلما قل ما نعرفه عن الكمية الأخرى .

2 لا ينشأ هذان المقداران للايقين من عيوب ما أو من حدود لدقة أجهزة القياس . إنهما قيود (أو حدود) أساسية توضع على ما نستطيع رصده حتى في أكثر التجارب كمالاً .

أسئلة وتخمينات

1 تخيل إنك في سفينة فضاء تنطلق بعيدًا عن الأرض بسرعة مقدارها 0.90 c وأن شعاع ليزر يصوب نحو السفينة من الأرض . فإذا قمت بقياس سرعة شعاع الليزر بالنسبة لسفينتك ، فكم ستكون سرعة الضوء ؟

2 تخيل أن لإحدى رائدات الفضاء طبقة صوت مثالية وأنها تستطيع التعرف على الفور على أن شوكة رنانة تصدر ترددًا يقع في مدى منتصف C عند طرقها . ما هو التردد الذى ستسمعه إذا استمعت إلى الشوكة الرنانة وهي داخل سفينتها الفضائية . بينما هي منطلقة عبر الفضاء بسرعة مقدارها 0.9 c ؟

3 يعيش معظم البشر لعمر أقل من 100 yr. . وحيث أن أقصى سرعة يمكن لشخص أن يكتسبها بالنسبة للأرض هي c . أى سرعة الضوء ، فإن الشخص الذى يغادر الأرض لن يبتعد عنها مسافة أبعد من مائة سنة ضوئية عبر الفضاء بعد أن يسافر مائة عام . هل يعنى هذا بالضرورة أنه لن يسافر بشر من الأرض لأبعد من مائة سنة ضوئية ؟ (السنة الضوئية الواحدة هي المسافة التي يقطعها الضوء في سنة واحدة أو 9.46×10^{15} m) .

4 افترض أن سرعة الضوء ليست سوى 20 m/s ، وأن جميع نتائج النسبية سيتم تطبيقها بعد استعمال هذه السرعة بدلاً من c . ناقش الكيفية التي ستتغير بها حياتنا عندئذ .

5 يجب أن يكون واضحًا من دراسة هذا الفصل أن المقولة « المادة لا تفنى ولا تستحدث من العدم » مقولة زائفة . ماذا نستطيع أن نقول بدلاً منها ؟

6 ناقش الوضع الذى سيتأثر به عالمنا لو أن الطبيعة تغيرت بحيث صار ثابت بلانك أكبر مما هو بمقدار 10^{32} مرة . اعتبر الموقف من زاويتين مختلفتين : (أ) تكمية طاقة المتذبذبات و (ب) مبدأ اللايقين .

7 كيف يفسر مفهوم الفوتون للضوء السمات التالية للأثر الكهروضوئى : (أ) الطول الموجى الحرج ، (ب) إن جهد الإيقاف يتناسب عكسيًا مع الطول الموجى ؟

8 كيف يمكن قياس دالة الشغل لفلز ما ؟ وكذلك ثابت بلانك ؟

9 اكتب قائمة بالتجارب التى يسلك فيها الضوء سلوك الموجات وقائمة أخرى تكون فيها طبيعته الكمية هى المهمة . هل هناك تجربة فى قائمتك ، يمكن تفسيرها من وجهتى النظر ؟

10 عندما يسطع ضوء على سطح عاكس فى الفراغ فإن ذلك السطح يتعرض لضغط ما من جانب الضوء . اشرح هذه الظاهرة . هل يختلف مقدار الضغط لو كان السطح أسود بحيث يمتص الضوء ؟

11 لو أمكن استغلال طاقة كتلة الوقود ، فما عدد الكيلو جرامات من الوقود ستلزم لتوفير الطاقة لمدينة بها نحو 300,000 نسمة فى عام كامل ؟

12 ما مقدار التغير فى القدرة بالنسبة لهوائى محطة إذاعة محلية عندما ينتقل من حالة طاقة تذبذب مكماة إلى حالة مجاورة ؟ ما هو الطول الموجى والتردد الذى يكون للفوتونات المنبعثة فى هذا التغير ؟

13 من المعروف أن الضوء فوق البنفسجى يسبب احمرار الجلد عند التعرض للشمس . اشرح السبب . يصر بعض الناس على أن جلودهم تحمر بسهولة أكبر إذا كانت مبتلة . هل ترى أى سبب لذلك ؟

مسائل

الأقسام من 1-26 إلى 3-26

1 تطير طائرة بسرعة مقدارها 360 m/s موازية لسطح الأرض . ثم سقط أحد المسامير من سقف الطائرة . أين يقع المسمار بالنسبة لنقطة تقع أسفل المكان الأصلى للمسمار مباشرة ؟ المسافة بين سقف الطائرة والأرضية 3.2 m .

2 تخيل أنك داخل مصعد يرتفع بسرعة ثابتة مقدارها 2.8 m/s . ثم أسقطت عملة معدنية من يدك ، من ارتفاع 1.4 m فوق أرضية المصعد . كم ستستغرق العملة من الوقت لكى تصل للأرضية ؟ أعد حساباتك إذا كان المصعد واقفًا .

3 يجرى قطاران جنبًا إلى جنب على قضبان متوازية . ويسبق أحد القطارين وليكن (أ) القطار الآخر (ب) بسرعة 1.2 m/s بينما يسير أحد الركاب نحو مقدمة القطار بسرعة 0.5 m/s ، بينما يسير أحد الركاب نحو مؤخرة القطار بسرعة 0.5 m/s . ما هما سرعتا الشخصين كما يرصدها راكب داخل القطار (ب) ؟

4 يتحرك قطار إلى الأمام ببطء وبسرعة 3 m/s. ويجرى داخل إحدى عربات القطار مسافر بسرعة 3 m/s نحو مؤخرة القطار ؟ (أ) ما هى سرعة المسافر كما يرصدها شخص يقف على رصيف المحطة ؟ (ب) وكم ستكون السرعة المرصودة لو أن المسافر عكس اتجاه سرعته ؟

5 قذف صبى داخل قطار يسير شرقًا بسرعته 16 m/s ، كرة نحو الغرب بسرعة 4 m/s . (أ) ما هى سرعة الكرة بالنسبة لشخص يقف ساكنا بالقرب من قضبان القطار ؟ وبالنسبة لمسافة داخل القطار ؟

■ 6 تخيل أنك على سطح القمر وتريد أن تضبط ساعتك على إشارة لضبط الوقت على الأرض ، وقد تلقيت رسالة بالراديو تقول أن الوقت هو الخامسة تمامًا بواسطة نغمة معينة . ما هو الوقت الذى تضبط عليك ساعتك فى لحظة النغمة ؟ خذ المسافة من القمر إلى الأرض على أنها 3.8×10^{8} m .

▪ 7 عند السرعات المنخفضة فإن شخصًا ما يسير بسرعة v بالنسبة للأرض إذا اطلق مقذوفًا على طول خط حركته بسرعة مقدارها u بالنسبة لنفسه ، فإن سرعة المقذوف بالنسبة للأرض سيكون مقدارها ببساطة هو $u + v$. إلا أن هذا لن يكون صحيحًا إذا كانت السرعات نسبية وتقترب من c ، لأن الناتج سيكون أكبر من c . (فلو أن $v = 0.7$ c مثلا) ، $u = 0.6$ c ، لكانت السرعة المتوقعة 1.3 c بالنسبة للأرض وهو ما يعد مستحيلاً طبقًا لنظرية النسبية الخاصة) . وقد أثبت أينشتين أن السرعة النسبية تعطى بالعلاقة : $\frac{u+v}{1+uv/c^2}$

فإذا كانت سفينة فضاء تتحرك بسرعة مقدارها $v = 0.7\,c$ وأطلقت قذيفة فى نفس خط حركتها بجوار الأرض وبسرعة مقدارها $u = 0.8\,c$ ، فكم تكون سرعة المقذوف النسبية بالنسبة للأرض ؟

▪ 8 فى ضوء نفس الظروف المذكورة فى المسألة رقم 7 ، تخيل أن رائد فضاء داخل سفينة الفضاء يرسل نبضة ضوئية . أوجد مقدار سرعة هذه النبضة بالنسبة للأرض . (قبل أن تقوم بحل المسألة ، هل تستطيع أن تعطى الإجابة من اعتبارات فروض النسبية الخاصة ؟) .

القسم 4–26

9 تخيل أنك فى رحلة عبر الفضاء داخل سفينة فضائية تتحرك بسرعة مقدارها 0.88c . وعندما تستعمل ساعة إيقاف جيدة فإنك تجد معدل النبض لديك 68 نبضة فى الدقيقة . كم يكون معدل النبض لديك إذا تم قياسه (أ) بواسطة زميل لك فى الرحلة داخل السفينة ، (ب) بواسطة شخص على سطح الأرض ؟

10 منحت رائدة فضاء تحت التمرين تصريحاً بأن تؤدى اختبار الفيزياء الذى مدته 2.0 h أثناء وجودها داخل سفينة الفضاء التى تنطلق بسرعة مقدارها 0.92 c بالنسبة للأرض . ما المدة التى سيسمح لها بها بواسطة ملاحظ (أ) معها بالسفينة ، (ب) موجود على الأرض ؟

11 وجد أن الزمن الدورى لبندول بسيط هو 2 s عندما يقاس فى مناط إسناده ذى القصور الذاتى . وعندما مر مشاهد بجوار البندول متحركًا بسرعة كبيرة جدًا وقاس الزمن الدورى لنفس البندول وجده يساوى 6 s ما هو مقدار سرعة المشاهد ؟

▪ 12 افترض أن سفينة الفضاء « إنتربرايز » قد زودت بهوائى دوّار ويكمل دورة كاملة فى 0.5 s كما تقاس من داخل السفينة . فإذا كانت السفينة تنطلق بعيدًا عن الأرض بسرعة مقدارها 0.84 c ، فكم تكون الفترة التى تستغرقها دورة كاملة للهوائى طبقًا لمشاهده راصد على الأرض ؟

13 تتحلل مادة غير مستقرة بحيث يفقد نصفها فى 960 يومًا . فإذا وضعت هذه المادة داخل سفينة فضاء تسافر بسرعة مقدارها 0.90 c ، فكم يستغرق انحلال نصف المادة طبقًا (أ) لشاهد داخل سفينة الفضاء و (ب) لشاهد على سطح الأرض ؟

▪ 14 البيون هو جسم دون نووى ويبلغ عمره 2.6×10^{-8} s . ما هى سرعة حزمة من البيونات تقطع مسافة مقدارها 20 m داخل المعمل قبل انحلالها ؟

▪ 15 اكتشف العلماء فى أحد معامل الأبحاث نوعًا جديدًا من حزم الجسيمات التى تنطلق لمسافة 5.6 m قبل أن تتحلل الجسيمات . وقد وجد أن مقدار سرعتها فى المعمل هو 0.9880 c . ما هو عمر هذه الجسيمات الجديدة عندما ترصد وهى ساكنة فى المعمل ؟

▪ 16 زار الكابتن بيكارد الذى يبلغ من العمر أربعين سنة ، أخاه الأصغر الذى عمره ثلاثون سنة ، قبل أن ينطلق فى رحلة داخل سفينة الفضاء « إنتربرايز » . وبعد مرور ثلاث سنوات حسب الساعات الموجودة داخل سفينة الفضاء ، يعود الكابتن بيكارد فيجد أخاه يحتفل بعيد ميلاده الخامس والأربعين . ما هى المدة التى تغيبها حسب الساعات الأرضية ؟ وما متوسط السرعة التى سافر بها خلال الرحلة ؟

القسم 5-26

17 يبلغ طول سفينة فضاء حين يقاس على سطح الأرض 40 m . كم سيكون طول السفينة عندما يقاس بواسطة مشاهد على الأرض يرى السفينة وهى تمرق بجوار الأرض بسرعة مقدارها (أ) $0.3\ c$ و (ب) $0.9885\ c$ ؟

18 يقيس مشاهد طول عصا مترية عندما يكون المشاهد ساكنًا والعصا تنطلق أمامه بسرعة كبيرة موازية لطوله . وكانت نتيجة القياس هى 0.6 m . ما هى سرعة العصا ؟

19 يتحرك جسيم دون ـ نووى داخل جزء مستقيم طوله 25 m من مسارع الجسيمات فـى أحد معامل الأبحاث ، وبسرعة مقدارها $0.9880\ c$. ولو تخيلت أنك تطير مع هذا الجسم فكم سيكون طول الجزء المستقيم من المعجل بالنسبة لك ؟

20 مكعب طول ضلعه 4 cm عندما يكون ساكنًا . ثم أطلق المكعب ليتحرك بسرعة كبيرة مقدارها $0.82\ c$ موازيا ؟ لأحد أضلاعه . (أ) ما هو شكل المكعب بالنسبة لمشاهد يقف ساكنًا ؟ (ب) ما هو حجمه المُشاهَد عندما يندفع عبر المعمل ؟

■ 21 يبعد أقرب نجم من الأرض 4.1×10^{16} m تقريبًا . فإذا سافرت بسرعة مقدارها $0.84\ c$ فى سفينة فضاء ، فكم من الوقت تستغرق الرحلة إلى ذلك النجم (أ) كما يراه مشاهد يقف ساكنًا على الأرض ؟ و (ب) كما يراه مشاهد موجود داخل السفينة ؟

■ 22 تتحرك سفينة فضاء بسرعة مقدارها $0.92\ c$ بالنسبة لمنصة فضائية بها طريق للهبوط طوله 6000 m . ما هو طول ذلك الطريق كما يقيسه مشاهد داخل السفينة أثناء طيرانها أمام المنصة الفضائية ؟

■ 23 تتحرك شاحنة نصف نقل طولها 5 m بسرعة مقدارها 100 km/h . ما هو طول الشاحنة كما يبدو لمشاهد يقف ساكنًا على جانب الطريق ؟ **تلميح** : بالنسبة للحالة التى تكون فيها $v/c \ll 1$ ، يمكنك استخدام التقريب $\sqrt{(1-v^2/c^2)} = 1 - v^2/2c^2$.

■ 24 تخيل أنك قمت بقياس طولى سفينتين فضائيتين ، أحداهما ساكنة والأخرى تتحرك بسرعة مقدارها $0.92\ c$ ، وأنك وجدت طوليهما متساويين . وكان صديق لك مسافرًا داخل السفينة المتحركة . أوجد النسبة بين طولى السفينتين كما يراها صديقك . واعتبر أنك تقف ساكنًا على سطح الأرض .

القسم 6-26

25 ما هى السرعة التى تكون كتلة جسيم فيها أكبر مائة مرة من كتلة سكونه ؟

26 كتلة سكون الإلكترون هى $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$ kg . أوجد النسبة m/m_0 لإلكترون عندما يكون مقدار سرعته (أ) $0.1\ c$ ، (ب) $0.001\ c$ ، (جـ) $0.6\ c$ و (د) $0.99\ c$.

27 أوجد كتلة وسرعة إلكترون تم تعجيله فى فرق للجهد مقداره (أ) 300 V و (ب) 30.000 V .

28 أوجد طاقة حركة إلكترون عندما يكون متحركًا بالسرعات المذكورة فى الأجزاء من (أ) إلى (د) فى المسألة رقم 26 .

29 ما هى سرعة جسيم طاقة حركته 8 أضعاف طاقة كتلة السكون لديه ؟

■ 30 تعجل الجسيمات فى المعجلات النووية الحديثة أحيانًا لطاقات مرتفعة للغاية . (أ) احسب كتلة بروتون طاقة حركته 6×10^9 eV . (ب) وما هى سرعته ؟ اعتبر كتلة سكون البروتون m_0 مساوية 1.67×10^{-27} kg .

31 افترض أن 100 g من المادة قد تحولت تمامًا إلى طاقة . (أ) ما مقدار الطاقة الناتجة ؟ (ب) وإذا استخدمت هذه الطاقة فى تشغيل مصباح قدرته 75 W ، فما الفترة التى يظل فيها مشتعلاً ؟

32 تتطلب إذابة 1.0 kg من الثلج طاقة مقدارها 334 kJ تقريبًا . ما هى النسبة المئوية للزيادة فى كتلة الثلج بسبب الطاقة التى أضيفت لإتمام عملية الذوبان ؟

33 عند حرق 2.0 g من الهيدروجين مع 16 g من الأكسجين يتكون 18 g من الماء . وينتج عن هذا التفاعل الكيميائي طاقة مقدارها 572 kJ تقريبًا . ما مقدار الكتلة المفقودة في هذه العملية الكيميائية ؟ وهل يمكن اكتشاف التغير في الكتلة ؟

القسم 7-26

34 احسب الطاقة ، مقدرة بالإلكترون فولت وبالجول لفوتون ينتمي إلى (أ) تردد موجة لاسلكية 95 MHz و (ب) ضوء فوق بنفسجي 10^{16} Hz .

35 احسب طاقة فوتون ـ مقدرة بالإلكترون فولت وبالجول ـ إذا كان طوله الموجي (أ) 5 cm ، (ب) 955 nm ، (جـ) 489 nm و (د) 10 nm .

36 أوجد الطول الموجي لفوتون طاقته (أ) 3 eV ، (ب) 3 keV و (جـ) 1.2 MeV .

37 متوسط طاقة الحركة الحرارية الانتقالية لجسيم ما $\frac{3}{2}kT$. (أ) ما هو الطول الموجي لفوتون يكافئ هذه الطاقة الحرارية عند 30°C ؟ (ب) ما نوع الإشعاع الناتج ؟

■ 38 تسقط كرة مصمتة كتلتها 1 kg من ارتفاع 5 m . فلو أمكن تحويل كل طاقة تلك الكرة إلى فوتونات ضوء مرئي طوله الموجي 589 nm فكم يكون عدد تلك الفوتونات ؟

■ 39 ما هو الارتفاع الذي على الكرة المذكورة في المسألة السابقة السقوط منه حتى يكون لها طاقة فوتون واحد طوله الموجي 434 nm ؟

■ 40 ينبعث من ليزر هليوم ـ نيون قدرته 0.5 mW إشعاع طوله الموجي 633 nm . (أ) ما هي طاقة فوتون في هذا الإشعاع ؟ (ب) كم عدد الفوتونات المارة بنقطة معينة في الحزمة في الثانية الواحدة ؟

القسم 8-26

41 الطول الموجي الحرج للإنبعاث الكهروضوئي من مادة معينة هو 432 nm . أوجد دالة الشغل لهذه المادة (مقدرة بالإلكترون فولت) .

42 ما هي دالة الشغل (بالإلكترون فولت) لمادة طولها الموجي المشرفي 465 nm ؟

43 دالة الشغل للفضة هي 4.74 eV . (أ) ما هو الطول الموجي المشرفي للفضة ؟ (ب) في أي مناطق الطيف يقع هذا الطول الموجي ؟

■ 44 فلز ما ، دالة الشغل له قيمتها 1.25 eV . ويسقط ضوء أصفر طوله الموجي 589 nm على سطح ذلك الفلز .
أوجد (أ) طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة من السطح و (ب) الطول الموجي المشرفي لذلك الفلز .

■ 45 يسطع ضوء طوله الموجي 434 nm على سطح مادة دالة شغلها 1.4 eV . ما هي سرعة أكثر الإلكترونات المنبعثة من السطح طاقة ؟

■ 46 يسقط ضوء مجهول طوله الموجي على سطح الصوديوم الذي دالة شغله 2.3 eV . والسرعة القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة من السطح هي 1.2×10^6 m/s . ما هو الطول الموجي لهذا الضوء ؟

■ 47 عندما يسلط ضوء تردده 1.3×10^{15} Hz على سطح مادة ما ، فإن جهد الإيقاف الذي تم قياسه للإلكترونات الضوئية هو 2.4 V . (أ) ما هي دالة الشغل لهذه المادة ؟ (ب) وما هو التردد المناظر للطول الموجي المشرفي ؟

■ 48 يسطع إشعاع طوله الموجي 340 nm على سطح البوتاسيوم (دالة الشغل له 2.3 eV) . احسب جهد الإيقاف الكهروضوئي في هذه الحالة .

■ 49 تبلغ طاقة تفكك (أي الطاقة اللازمة لفصل الذرات المكونة للجزئ عن بعضها البعض) جزئ CN (سيانوجين) 1.22×10^{-18} J تقريبًا . (أ) ما هو أقصى طول موجي لإشعاع يمكنه فصل ذرات الجزء CN عن بعضها ؟ (ب) وما هو تردد هذا الإشعاع ؟ (جـ) وفي أي مناطق الطيف يقع هذا الإشعاع ؟

القسم 9-26

50 (أ) ما هي كمية تحرك فوتون طاقته 16 eV ؟ (ب) ما هو وجه المقارنة مع كمية تحرك إلكترون طاقته 16 eV ؟

51 أوجد مقدار الدفع الذى يؤثر به فوتون طوله الموجى 486 nm على سطح ما عندما (أ) يتم امتصاصه (ب) ينعكس مرتدًا من السطح .

52 احسب الكسر النسبى للطول الموجى لكومتون ، $(\lambda'-\lambda)/\lambda$ بالنسبة لفوتون يتصادم مع إلكترون حر تصادمًا بالمواجهة ، ثم يتطاير مرتدًا إلى الخلف مباشر إذا (أ) $\lambda = 489$ nm و (ب) $\lambda = 0.45$ nm .

■ 53 يضرب فوتون طوله الموجى 0.45 nm إلكترونًا حرًا ساكنًا ، ثم يتشتت مرتدًا إلى الخلف مباشرة . ما هى سرعة الإلكترون بعد التصادم ؟ وهل يكون الإلكترون نسبويًا ؟

■ 54 يبعث ليزر هليوم ـ نيون قدرته 0.5 mW ، بضوء طوله الموجى 633 nm فى حزمة مساحة مقطعها المستعرض $3.6\ mm^2$. (أ) أوجد عدد الفوتونات التى تضرب سطحًا متعامدًا مع الحزمة فى الثانية . ما هى القوة التى تؤثر بها الحزمة على السطح ؟ (ب) عندما يتم امتصاصها تمامًا و (جـ) عندما تنعكس كلية ؟

■ 55 تصطدم فوتونات أشعة إكس طولها الموجى 0.800 nm بإلكترونات حرة فى هدف من الكربون . (أ) أوجد الطول الموجى للفوتونات المتطايرة التى تخرج بزاوية مقدارها $90°$ بالنسبة لاتجاه الإشعاع الساقط . (ب) ما مقدار كمية التحرك التى يتم نقلها إلى الإلكترونات الحرة ؟

56 عندما يتطاير فوتون لأشعة إكس طولها الموجى 0.680 nm من إلكترون حر ساكن ، فإن الإلكترون يرتد بسرعة مقدارها 1.2×10^6 m/s . (أ) كم بلغ الاختلاف $\Delta\lambda$ لكومتون فى الطول الموجى للفوتون ؟ (ب) عند أية زاوية يمكن رؤية الفوتون المتطاير ؟

القسمان 10-26 و 11-26

57 أوجد الطول الموجى لدى برولى لإلكترون عُجِّل من السكون خلال فرق للجهد مقداره 1200 V .

58 ما هو الطول الموجى لدى برولى لبروتون يتحرك بسرعة مقدارها (أ) 10^4 m/s ، (ب) 10^6 m/s ؟

59 ما هو الطول الموجى لدى برولى لسيارة تزن 1600 kg وتتحرك بسرعة مقدارها 120 km/h ؟

60 ما هى سرعة جسيم الطول الموجى لدى برولى له 0.4 nm لو كان هذا الجسيم (أ) إلكترونًا و (ب) بروتونًا ؟

61 ما هو فرق الجهد المطلوب لتعجيل إلكترون من السكون حتى يتخذ طول دى برولى الموجى 6×10^{-9} m ؟

62 عجل جسيم الفا (وهو نواة هليوم كتلتها $m = 4 \times 1.67 \times 10^{-27}$ kg وشحنتها $(q = +2e)$ من السكون خلال فرق للجهد مقداره 1500 V . ما هو طول دى برولى الموجىّ لجسيم ألفا هذا ؟

■ 63 متوسط طاقة حركة إلكترون حر داخل فلز ما يعطى بالعلاقة $\frac{3}{2}kT$ عند درجات الحرارة المرتفعة . (أ) ما هو طول دى برولى الموجى لإلكترون حر فى فلز عند 27°C ؟ (ب) عند أية درجة حرارة يصبح طول دى برولى الموجى للإلكترون 0.8 nm ؟

■ 64 تم تعجيل إلكترون من السكون خلال فرق جهد V (بالفولت) . إثبت أنه عند إهمال الآثار النسبوية ، فإن طول دى برولى الموجى للإلكترون يمكن التعبير عنه كما يلى : $\lambda\,(\text{nm}) = \frac{1.228}{\sqrt{V}}$ (بوحدات نانومتر) .

القسم 12-26

65 اعتبر أن هناك إلكترونًا محصورًا داخل صندوق جهد ذى بعد واحد $L = 0.53$ nm (أ) احسب الأطوال الموجية الثلاثة الأولى الرنينية للإلكترون . (ب) احسب طاقة مستويات الطاقة الثلاثة الأولى للإلكترون .

66 بروتون محصور فى صندوق ذى بعد واحد عرضه 1.0×10^{-5} nm (وهو ما يقابل حجم نواة ذرية تقريبًا) . أوجد طاقة المستويات الثلاثة الأولى للبروتون فى الصندوق .

67 يبلغ أدنى مستوى طاقة لإلكترون محصور فى صندوق ذى بعد واحد 4 eV . وطاقة المستوى التالى له $(n = 2)$ هى 15 eV . أوجد الطول التقريبى للصندوق .

68 علقت كتلة مقدارها 100 g من طرف زنبرك ذى ثابت زنبرك مقداره 0.040 N/m . (أ) ما هو تردد الذبذبة الطبيعى لهذا النظام ؟ (ب) ما مقدار فجوة الطاقة بين قيم الطاقة المسموح بها بالنسبة لهذا المتذبذب ؟ عبر عن إجابتك بالجول وبالإلكترون فولت .

69 يسلك جزئ بروميد الهيدروجين فى كثير من الوجوه ، مسلك متذبذب (على هيئة كرتين مرتبطتين معًا بواسطة زنبرك وتهتزان جيئة وذهابًا) تردده الطبيعى 8.66×10^{13} Hz ، أوجد بالإلكترون فولت وبالجول ، فجوة الطاقة بين مستويات الطاقة المسموح بها لهذا المتذبذب .

■ 70 يبلغ أدنى مستوى للطاقة (ويسمى أيضًا طاقة نقطة الصفر) لمتذبب توافقى مكمى معين 6 eV . (أ) ما هو تردد هذا المتذبذب ؟ (ب) ما هى فجوة الطاقة بين مستويات الطاقة المسموح بها لهذا المتذبذب ؟

■ 71 أوجد طاقة نقطة الصفر (طاقة أدنى مستوى) لجزئ NO إذا أمكن اعتباره متذبذبًا توافقيًا تردده الطبيعى 5.63×10^{13} Hz .

القسم 13-26

72 تنطلق كرة بيسبول كتلتها 15 g بسرعة مقدارها 24 m/s . إذا كانت سرعتها يمكن أن تقاس بدقة تصل إلى 0.5 بالمائة فما هو أدنى « لايقين » فى موضعها ؟

73 حجز إلكترون فى منطقة داخل 0.53 nm . ما مقدار اللايقين فى قياس كمية تحركه ؟

74 تبلغ طاقة إلكترون فى ذرة ما نحو 2.3 eV . ما هو أدنى وقت يلزم لقياس هذه الطاقة بدقة تصل إلى 0.5 بالمائة ؟

75 لدينا بروتون محصور داخل نواة نصف قطرها النموذجى 5×10^{-15} m تقريبًا . فإذا اعتبرنا هذا المقدار على أنه مقدار اللايقين فى وضع البروتون ، فكم سيكون أدنى مقدار للايقين فى كمية تحرك البروتون ؟ وفى طاقته بالإلكترون فولت ؟ اعتبر البروتون غير نسبوى .

76 بروتون معين طاقة حركته 5 MeV . إذا افترضنا أن كمية تحرك البروتون يمكن قياسها بمقدار 1% من اللايقين ، احسب مقدار اللايقين فى موضعه . **تلميح** : يمكن اعتبار البروتون الذى طاقته 5 MeV غير نسبوى .

■ 77 تستغرق ذرة ما ما يقرب من 1×10^{-9} s لكى تطلق فوتونًا طوله الموجى 510 nm . ما مقدار اللايقين فى طاقة هذا الفوتون ؟

■ 78 إذا كان مقدار ثابت بلانك 66 J.s بدلاً من 6.63×10^{-34} J.s فكم سيكون الطول الموجى لدى برولى بالنسبة للاعب بيسبول يزن 80 kg ويجرى بسرعة مقدارها 6 m/s ؟ وما مقدار اللايقين بالتقريب فى موضع اللاعب بالنسبة لحكم المباراة الذى يحاول أن يطلق النداء الصحيح عند لوح « البيت » ؟

مسائل عامة

■■ 79 تخيل أن كائنات متفوقة تعيش على كوكب بالقرب من النجم الفا سنتورى الذى يبعد عن الأرض بنحو 4.1×10^{16} m ، ويريدون أن يبعثوا سفينة فضائية نحو الأرض بسرعة مقدارها 0.9970 c . وكانت السفينة ملوثة بزوج من الجراثيم التى تتكاثر بحيث يتضاعف عددها كل 8.4×10^{5} s . كم يبلغ عدد الجراثيم على تلك السفينة عندما تمر بالأرض ؟ اجب لو أن هذا العدد يتم رصده بواسطة كائنات فى السفينة أو من فوق سطح الأرض .

■■ 80 الطرق فى منطقة أيوا الريفية مصممة بحيث تكون فى الغالب متجهة من الشمال للجنوب أو من الشرق للغرب وبين كل اثنين منها 1.6 km . (أ) إذا حلقت طائرة باتجاه الغرب فوق منطقة ريفية ، فإن الطرق الممتدة من الشمال للجنوب ستبدو وكأن بينها مسافة 1.0 km فقط . ما هى سرعة طيران الطائرة ؟ (ب) إذا نظر أحد سكان أيوا إلى أعلى نحو الطائرة عندما تحلق فوقه لوجد أن طولها 20 m . ما هو طول الطائرة عندما تكون ساكنة على أرض المطار ؟ (جـ) يحمل أحد المسافرين على الطائرة ساعة معقدة لقياس الزمن الذى تستغرقه الطائرة لكى تنتقل من طريق إلى الذى يليه . ما هو الوقت الذى ستبينه تلك الساعة ؟ (د) ويقوم أحد سكان أيوا بقياس الوقت الذى تستغرقه الطائرة لتنتقل من طريق إلى الذى يليه . فما هو هذا الوقت ؟

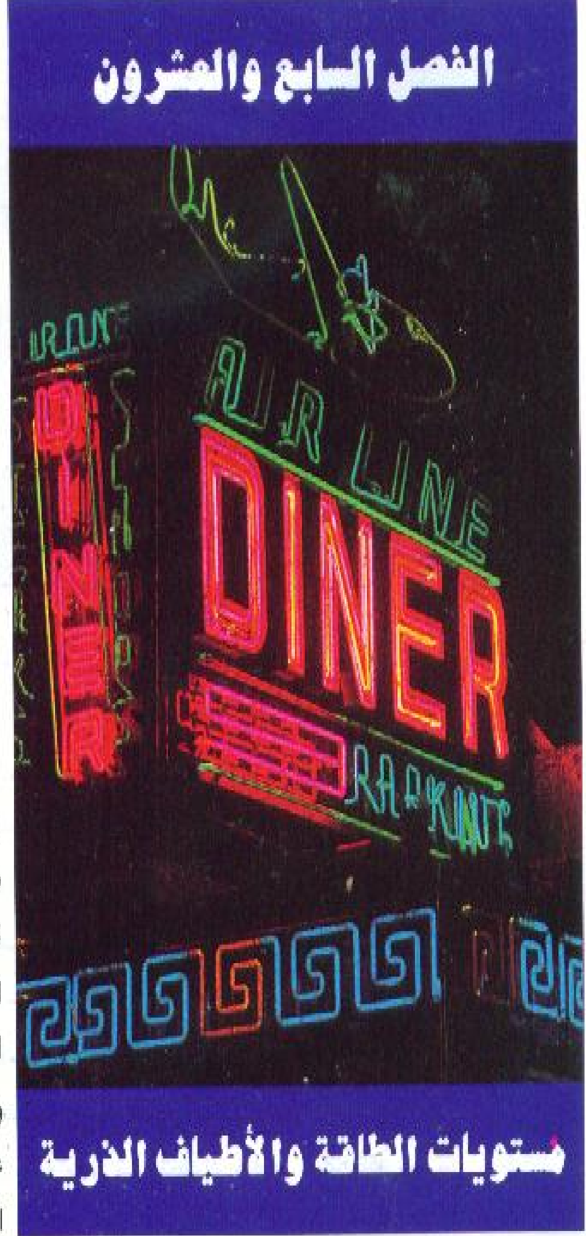
■■ 81 يبعد النجم الفا سنتورى عن الأرض 4.1×10^{16} m . تخيل أن سفينة فضاء يمكن إرسالها إلى هذا النجم بسرعة مقدارها 2.1×10^{8} m/s . (أ) ما الوقت الذى تستغرقه هذه الرحلة طبقًا للساعات الأرضية ؟ (ب) ما هو الزمن الذى تسجله الساعات الموجودة داخل السفينة لهذه الرحلة ؟ (جـ) ما هى المسافة التى سيقيسها ركاب السفينة بين الأرض والنجم ؟ (د) كم ستبلغ السرعة الظاهرية للسفينة كما يحسبها ركاب السفينة بناء على نتائج الجزئين (ب) و (جـ) ؟

■■ 82 يزن مكعب مصمت طول ضلعه 1 m عشرة كيلو جرامات 10 kg . افترض أن المكعب يتحرك بسرعة مقدارها 0.88 c موازيًا لأحد أضلاعه . (أ) ما مقدار كثافة المكعب (الكتلة لوحدة الحجوم) بالنسبة لمشاهد يتحرك مع المكعب ؟

■■ 83 أرسل بعض سكان الفضاء الخارجي الذين يستقلون سفينة فضاء تقترب من الأرض بسرعة مقدارها 0.4 c ، مجسًا نحو الأرض . وسجل المشاهدون على سطح الأرض سرعة السفينة على أنها 0.5 c . ما هى سرعة المجس التى تقاس من على سفينة الفضاء ؟ **تلميح** : انظر المسألة رقم 7 .

■■ 84 يصل معدل الطاقة الشمسية التى تدخل إلى طبقات الجو العليا للأرض نحو 1.8×10^{17} W تخيل أن كل هذه الطاقة قد امتصتها الأرض وحولتها إلى كتلة . ما هى الزيادة فى كتلة الأرض على مدى فترة زمنية تصل إلى مائة عام ؟

■■ 85 ما قيمة أقصى جهد يكون معه التعبير الخاص بالطول الموجى المشتق فى المسألة 64 صحيحًا فى حدود دقة تصل إلى 5 بالمائة ؟



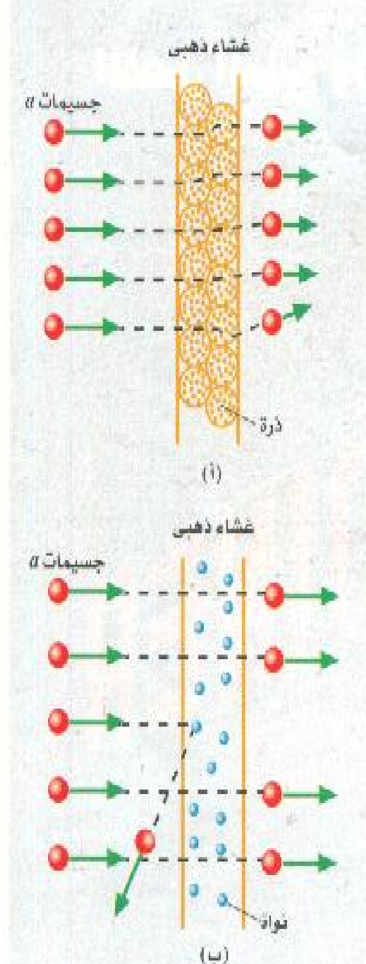
تميزت السنوات الخمس من 1923 إلى 1928 بأهمية استثنائية فى الفيزياء . ففى عام 1923 أوضح اكتشاف الخواص الموجية للجسيمات الطريق نحو فهم كيفية سلوك الإلكترونات داخل الذرات . وبحلول عام 1928 ، وبفضل تمثيل شرودنجر للميكانيكا الموجية لم يعد تركيب مستويات الطاقة الذرية والطريقة التى تقوم فيها الذرات بإشعاع الضوء وامتصاصه ، غامضًا على الإطلاق وسندرس فى هذا الفصل كيف فسر التصور الموجى الشئون الداخلية للذرات .

27-1 التاريخ الحديث للذرات

على الرغم من وجود الكثير من التكهنات حول الذرة ، إلا أن الأمر استدعى الانتظار حتى عام 1911 حين أُقر النموذج النووى للذرة ، فقد تمكن فى ذلك العام العالم أرنست رذرفورد ومعاونوه من إجراء التجربة الموضحة تخطيطيًا فى الشكل 1-27 . وقد استخدم الجسيمات المنبعثة من عنصر الراديوم المشع كقذائف . وكانت تلك الجسيمات ـ جسيمات ألفا (α) ، وهى ما تعرف الآن بأنها نوى ذرات الهليوم . لقد صوبت حزمة من تلك الجسيمات نحو غشاء رقيق من الذهب لم يكن سمكه يزيد على بضع مئات من الذرات .

وقد توقع رذرفورد النتيجة المبينة فى الجزء (أ) ، فكما تخترق الرصاصات لوحًا من الورق المقوى ، فإن المتوقع أن تقوم الذرات بإبطاء الجسيمات أو قد تسبب لها انحرافًا

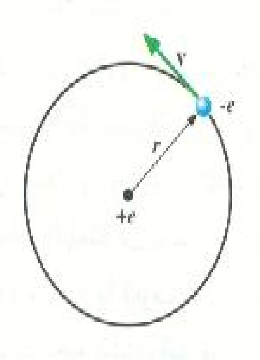
طفيفًا . على أن النتيجة بدلاً من هذا كانت كما يوضح الجزء (ب) من الشكل : على الرغم من أن معظم الجسيمات لم يسبب لها الغشاء أى انحراف ، فإن عددًا قليلاً جدًا منها قد انحرف بشدة كما لو كانت قد ارتطمت بجسم ضئيل للغاية ولكنه ثقيل جدًا فى نفس الوقت . وقد استغل رذرفورد هذه المشاهدات ووضع المفهوم الحديث حول الذرة وهو ما يعرف **بالذرة النووية** .



شكل 27-1:
قذف رذرفورد جسيمات α عبر غشاء رقيق من الذهب . (أ) التنبؤ الأصلى لما يمكن أن يحدث . (ب) المفهوم المطلوب لتفسير النتائج التجريبية .

توجد عند مركز الذرة **نواة** ضئيلة جدًا : حيث يبلغ نصف قطرها نحو 10^{-15} m ويتركز فيها نحو 99.9 بالمائة من كتلة الذرة . وتحمل النواة شحنة موجبة مقدارها Ze ، حيث e هى القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون ، أما Z فهى العدد الذرى للعنصر المعنى ، وهو يساوى عدد البروتونات داخل النواة ($Z = 1$ للهيدروجين و 2 للهليوم ، و 3 لليثيوم ، وهلم جرًا) . ونصف قطر الذرة يقترب من 40,000 مرة قدر نصف قطر النواة ولذلك فإن النواة هى فى الحقيقة نقطة ضئيلة عند مركز الذرة . ويدور Z إلكترون فى الفضاء الرحب للذرة خارج النواة وهى تحمل من الشحنة ما مجموعه $-Ze$ وبهذا تكون الذرة متعادلة كهربيًا . وقد أصبحنا حاليًا نعرف أن الطبيعة الموجية للإلكترون تغلب على طبيعته الجسيمية فيما يتعلق بتحديد الخواص الفيزيائية للذرة ، وكما نرى فإن حجم الذرة هو فى الغالب خاوٍ .

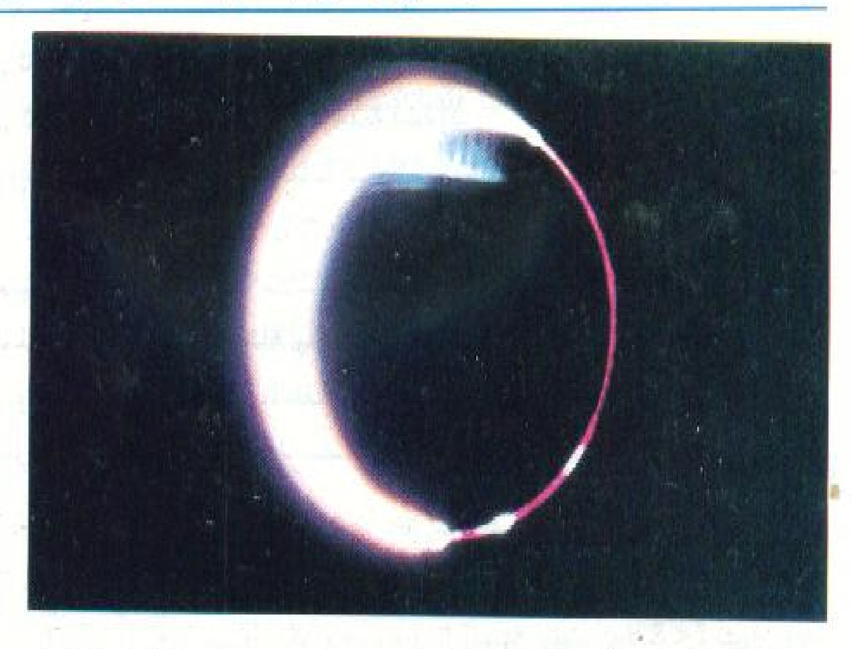
وأبسط الذرات جميعًا ، ذرة الهيدروجين التى تتكون من بروتون منفرد هو بمثابة النواة والكترون منفرد ، والنموذج المبين فى الشكل 27-2 يتفق مع نتائج رذرفورد فالإلكترون يدور حول النواة ، وتقوم قوى كولوم للتجاذب المؤثرة عليه من جانب النواة بتحقيق قوة الجذب المركزى المطلوبة . على أن مثل هذا النموذج لابد أن يؤدى دور هوائى موجات كهرومغناطيسية لأنه يشبه كثيرًا ثنائى قطب متذبذب . فإذا قام بهذا الدور فإن الذرة لابد أن « تتهاوى » عندما تفقد طاقة بالإشعاع ، ومن ثم يتحرك الإلكترون فى مسار حلزونى إلى أن يصطدم بالنواة . إلا أن ذرات الهيدروجين لا تسلك هذا المسلك ، إذ إنها ـ فى العادة ـ لا تشع طاقة ، ولا يبدو عليها مطلقًا أنها تفنى ومعنى هذا أن النموذج المطروح لابد أن يكون خاطئًا بشكل أو بآخر .



شكل 27-2:
النموذج الكلاسيكى لذرة الهيدروجين . ويُصور الإلكترون على أنه يتحرك فى مدار دائرى حول النواة ذات البروتون الوحيد .

على أن ذرات الهيدروجين قد يمكن حثها على إطلاق إشعاع تحت ظروف معينة وقد ثبت لسنين عديد قبل 1900 أن الغازات بل وحتى الجوامد المتبخرة يمكن جعلها تشع ضوءًا (أى يمكن **إستثارة** ذراتها) وذلك بإمرار شرارة كهربية أو تفريغ جهد مرتفع خلالها . (غاز النيون المستعمل فى الإعلانات ـ مثلاً ـ يشع ضوءًا أحمر عند حدوث تفريغ غازى بواسطة قطبى جهد مرتفع عند طرفى الأنبوبة) . ويمكن دراسة الأطوال الموجية للضوء المنبعث من هذه الغازات الساخنة ، أى طيفها باستخدام إسبكترومتر (مطياف) كالذى نوقش فى القسم 25-6 ويَبيّنه الشكل 25-17 .

لقد تم قياس الخطوط الطيفية المنبعثة من كثير من الذرات بالتفصيل حتى قبل عام 1900 . على أن العلماء ـ لعدم معرفتهم بتركيب الذرات ـ لم يكونوا قادرين على تقديم تفسير ذى معنى لتلك الأطياف . فذرات الهيدروجين مثلاً ، وليس H_2 لها أبسط الأطياف



يصبح الكروموسفير (الغلاف اللونـــــى) الأحمر للشمس مرئيًا عند حدوث كســوف الشمس ، كما يظهر عند الحافة اليمنـــى فى هذه الصورة . ويعــود الســبب فــى ظهور اللون الأحمر إلى خــط الانبعــاث الأحمر القوى لغاز الهيدروجين .

حيث يتكون الجزء المرئى من الطيف المنبعث للهيدروجين من سلسلة خطوط الطيف التى يوضحها الشكل 27-3 . (لاشك أنك تذكر من القسم 25-6 أن خط الطيف ما هـو فى الحقيقة إلا صورة لفتحة الإسبكترومتر ، ولكل طـول موجى صـورة منفصلة) . ولم يتيسر رؤية الخطوط الواقعة فى المنطقة فوق البنفسـجية مـن الطيـف إلا بواسطة الصور الفوتوغرافية ـ بالطبع ـ لأن العين البشرية غير قادرة على إبصار الموجات فوق البنفسجية .



شكل 27-3
سلسلة بالمر للخطوط الطيفية للهيدروجين .

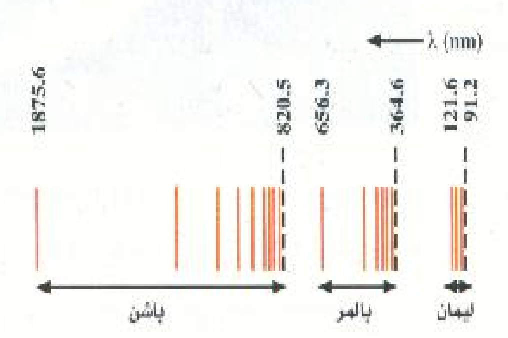
يلاحظ فى الطيف أن الخطوط تتقارب من بعضها البعض كلما قـل الطول الموجى ، وأنه لا توجد خطوط ذات طول موجى أقصر من $\lambda = 364.6$ nm ، حيث يسمى أقصر طول موجى فـى السلسلة **حد السلسلة** . ولابد أن هناك عددا لانهائيًا من الخطوط فـى هذه السلسلة وذلك حسب النظرية التى سنعرضها بعد قليل . لقد تمت التفرقة بين نحو 40 خطًا ؛ أما الباقى فهم من التكدس بحيث تصعب رؤية كل خط على حدة بوضوح .

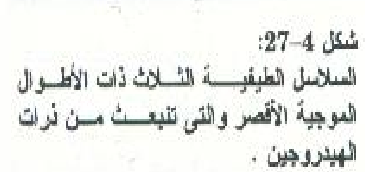
وحيث أن خطوط الطيف تبدو ذات نمط وترتيب محددين ، فإنه مـن الطبيعى أن نحاول صياغة قانون تجريبى ينتظم هذه الأطوال الموجية . وقـد تم عمل هـذا لأول مـرة بواسطة بالمر عام 1885 تقريبًا وأصبحت تلك السلسلة تعرف باسم **سلسلة بـالمر** . لقد وجد أن الأطوال الموجية للخطوط يمكن التعبير عنها بالمعادلة الملحوظة البساطة :

$$\text{بالمر}\quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 3, 4, 5, \ldots\ldots \qquad (27\text{-}1)$$

حيث $R = 1.097 \times 10^7 \, m^{-1}$ ويسمى ثابت ريدبرج تخليدًا لاسم الرجل الذى عين قيمته وتؤدى الأرقام الصحيحة بدءًا من 3 إلى مالانهاية إلى قيم الأطوال الموجية لخطوط سلسلة بالمر المبينة فى الشكل 3-27 . وعندما نضع n مساوية لمالانهاية فإن المعادلة تؤدى إلى حد السلسلة 364.6 nm .

وقد اكتشف فيما بعد أن ذرات الهيدروجين تنبعث منها سلاسل من الأطوال الموجية خلاف تلك التى تتضمنها سلسلة بالمر ، حيث تقع **سلسلة ليمان** فى منطقة الموجات فوق البنفسجية البعيدة ، وتقع **سلسلة باشن** فى المنطقة دون الحمراء (الشكل 4-27) وتخضع هذه السلاسل لمعادلات تشبه كثيرًا معادلة سلسلة بالمر :




شكل 4-27: السلاسل الطيفية الثلاث ذات الأطوال الموجية الأقصر والتى تنبعث من ذرات الهيدروجين .

$$\text{ليمان}: \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 2, 3, \ldots\ldots$$

$$\text{بالمر}: \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 3, 4, \ldots\ldots$$

$$\text{باشن}: \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 4, 5, \ldots\ldots$$

وهلم جرًا . . . ؛ حيث $R = 1.0974 \times 10^7 \, m^{-1}$ ، **وهو نفس المقدار الثابت لكل سلسلة** .

من الواضح أنها أكثر من مجرد مصادفة ، أن تنطبق مثل هذه المعادلات البسيطة على ظاهرة معقدة كانبعاث الضوء ، ولابد أن هناك بساطة هائلة فى سلوك الذرات ، وهى المسئولة عن ظهور هذه المجموعة المتميزة من العلاقات .

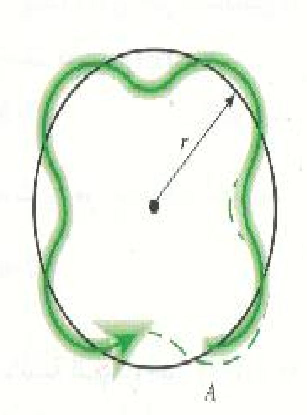
ثم ابتكر نيلز بوهر عام 1912 ـ حين كان طالبًا من الدانمارك يقضى عامًا فى منحة ما بعد الدكتوراه فى معامل رذرفورد بإنجلترا ـ أول تفسير مقبول لطيف الهيدروجين وقد بدأ بوهر بالنموذج الكلاسيكى فى الشكل 2-27 ، ولكى يلتف حول المشكلة المرتبطة بحقيقة أن هذا النموذج يتنبأ بإشعاع كالذى يحدث بالهوائى ، فقد تقبل ببساطة حقيقية أن بعض المدارات المستقرة المعينة ، يمكن للذرة أن تظل فيها بلا إشعاع . على أن سبب حدوث هذا الأمر لم يكن واضحًا بالنسبة لبوهر وإن كان قد جعله قادرًا على بيان كيفية صدور خطوط طيف الهيدروجين المشاهدة عمليًا .

وعلى الرغم من أهمية نظرية بوهر وقت ظهورها ، من حيث كونها ملهمة ودليلاً للباحثين الذين توالوا بعد ذلك ، إلا أنها أزيحت جانبًا بشدة. وتتلخص أكبر عيوبها فى

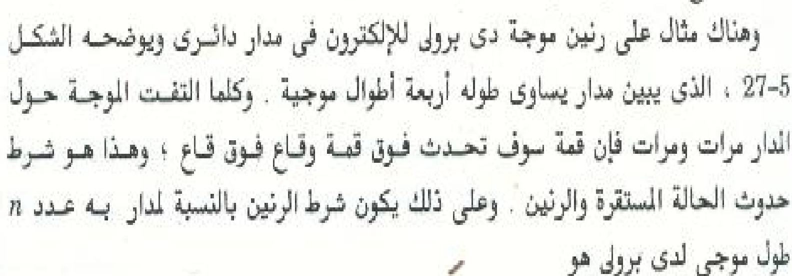
أن فرض بوهر الجسور حول وجود مدارات مستقرة لم يدعمه أى تفسير لسبب وجودها . . لقد أمكن تقديم هذا التفسير عام 1923 عندما اكتشف دى بروى أن للإلكترون خواصًا موجية . ولهذا سنقفز إلى الأمام فى التاريخ ونقدم وصفًا لنموذج مبكر لذرة الهيدرجين تم الاستعانة فيه بالطبيعة الموجية للإلكترون . وسنطلق عليه النظرية **شبه الكلاسيكية** للذرة . وعلى الرغم من أن المعالجة الصحيحة للذرة باستخدام ميكانيكا الكم قد أزاحته جانبًا ، إلا إننا سنفحصه لأنه سوف يعدُّنا لفهم النموذج المقبول حاليًا .

27-2 ذرة الهيدروجين شبه الكلاسيكية

دعنا نفترض أن ذرة الهيدروجين مكونة من إلكترون كتلته m يدور فى مدار حول النواة كما فى الشكل 2-27 . (ولكى نتمكن فيما بعد من تطبيق هذه الحسابات على ذرات أخرى حيث $Z > 1$ فإننا سنعتبر الشحنة النووية مساوية Ze . وللهيدروجين $Z = 1$) . ونعلم جيدًا أن للإلكترون خواص موجية وأن طول دى بروى الموجى له هو $\lambda = h/mv$. على أن الإلكترون لن يتواجد فى حالة مستقرة مالم تكوّن موجة دى بروى له موجة موقوفة داخل المدار . ولكى يحدث هذا الرنين ، لابد أن يكون طول المدار $2\pi r$ مساويًا لعدد صحيح من الأطوال الموجية .



شكل 5-27:
رنين موجات الإلكترون هو الذى يحدد المدارات المستقرة فى النموذج شبه الكلاسيكى ولو أن طول المدار $2\pi r$ كان مساويا لعدد صحيح من الأطوال الموجية فإن الموجة ستقوى نفسها عند عودتها إلى نقطة البداية A . وفى الحالة المبينة هنا $2\pi r = 4\lambda$.



وهناك مثال على رنين موجة دى بروى للإلكترون فى مدار دائرى ويوضحه الشكل 5-27 ، الذى يبين مدار يساوى طوله أربعة أطوال موجية . وكلما التفت الموجة حول المدار مرات ومرات فإن قمة سوف تحدث فوق قمة وقاع فوق قاع ، وهذا هو شرط حدوث الحالة المستقرة والرنين . وعلى ذلك يكون شرط الرنين بالنسبة لمدار به عدد n طول موجى لدى بروى هو

$$n\lambda_{\text{electron}} = 2\pi r_n \qquad n = 1, 2, 3, \ldots\ldots \qquad (27\text{-}2)$$

ويبين التحليل المفصل باستخدام الميكانيكا الموجية أن مدار الإلكترون الذى يحقق هذا الشرط للرنين لابد أن يكون مستقرًا . والإلكترون فى مثل هذا المدار لا يقوم بشكل متواصل بإشعاع الطاقة بالطريقة التى تفعلها شحنة نقطية تدور فى مدار حسب النموذج الكلاسيكى . وحيث أن $\lambda_{\text{electron}} = h/mv$ فيمكننا أن نعيد كتابة المعادلة (2-27) على الصورة المناسبة ونحلها بحثًا عن كمية التحرك الزاوية $r_n m v_n$ لإلكترون فى المدار رقم n :

$$r_n m v_n = n\left(\frac{h}{2\pi}\right) \qquad (27\text{-}3)$$

يلاحظ أن هذه المعادلة لكمية التحرك الزاوية هى نفس الشرط الذى وضعه بوهر لاختيار المدارات المستقرة ، وإن كان لم يستطع تقدير تبرير فيزيائى له . ونرى الآن لماذا كان لابد من صحته : إنه شرط حدوث رنين لموجة الإلكترون داخل الذرة ولسوء الحظ فإن كلاً من v_n و r_n غير معلومة فى المعادلة (3-27) ، وعلينا إيجاد معادلة أخرى للوصول إلى هاتين الكميتين اللتين تميزان المدارات الإلكترونية وقد تولى بوهر إيضاح كيفية عمل هذا .

يمكننا إيجاد معادلة ثانية إذا تنبهنا إلى أن قوى كولوم ، الكلاسيكية ، بين الإلكترون والنواة ذات الشحنة الموجبة ، هي التي توفر قوى الجذب المركزي التي تمسك بالإلكترون في مداره . فإذا اعتبرنا أن النواة الثقيلة ستظل ساكنة ، لأمكننا كتابة ما يلي للإلكترون المتحرك في المدار

قوة كولوم = قوة الجذب المركزي

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = k_e \frac{(Z_e)(e)}{r_n^2} \qquad (27\text{-}4)$$

حيث k_e هو ثابت قوة كولوم ($k_e = 8.99 \times 10^9$ N.m²/C²)

يمكننا الآن حل المعادلتين (3-27) و (4-27) آنيًا لإيجاد سرعة الإلكترون v_n ونصف قطر مداره r_n :

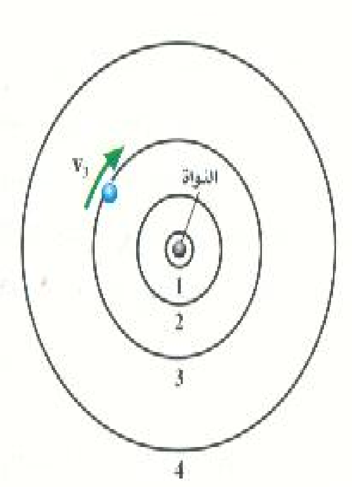
$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{و} \quad v_n = \frac{h}{2\pi n m r_1} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots\ldots \qquad (27\text{-}5)$$

حيث r_1 هو نصف قطر أصغر مدار ممكن ($n = 1$) ، ويعطى بالمعادلة

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 Z e^2 m k_e} \qquad (27\text{-}6)$$

وبالنسبة للهيدروجين $Z = 1$ و $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}$ m وهو يسمى **نصف قطر بوهر** ، نظرًا لأن بوهر تنبأ به بالنسبة لذرة هيدروجين غير مستثارة . وقد تنبأ بوهر أيضا فيما بعد بالمدارات المستقرة والتي تعطى أنصاف أقطارها بالمعادلة (5-27) ويطلق عليها أيضًا **مدارات بوهر** . وقد أثبتت التجربة أن لذرات الهيدروجين غير المستثارة نصف القطر 0.053 nm بالفعل كما تنبأت به هذه النظرية . وسنعرف في القسمين التاليين كيف تفسر النظرية طيف الهيدروجين الانبعاثي المشاهد بالتجربة .

27-3 مستويات طاقة الهيدروجين



شكل 6-27:
يقوم الإلكترون بالدوران حول النواة في سلسلة من المدارات المستقرة التي تحقق شرط الرنين ، ولن تتاح له أية مدارات أخرى مستقرة وحجم النواة في الشكل مبالغ فيه إلى حد كبير .

لقد رأينا أن ذرة الهيدروجين لابد أن تكون لها حالات مستقرة تكون فيها الذرة ثابتة ومتزنة . وقد توصلت النظرية التي ألممنا بها إلى أن تلك الحالات المستقرة تتكون من مدارات دائرية ذات أنصاف أقطار تعطى ، في حالة الهيدروجين ، بالعلاقة :

$$r_n = n^2 (0.53 \times 10^{-10}\ \text{m}) \quad , \quad n = 1, 2, \ldots\ldots$$

ويوضح الشكل 6-27 المدارات القليلة المستقرة الأولى ، وسنتعرف الآن على الطاقة التي للذرة في كل من هذه الحالات .

لابد لكل من الحالات المستقرة التي وجدناها من طاقة مميزة لها . وطاقة الذرة تتكون من شقين ، أحدهما هو طاقة حركة الإلكترون عندما يتحرك في مداره ، وتعطى هذه الطاقة - بالنسبة للمدار رقم n بالعلاقة ،

$$(\text{KE})_n = \frac{1}{2} m v_n^2$$

حيث أمكن لنا إهمال ظواهر النسبية ؛ وعند استعمال المعادلة 4-27 تصبح هذه العلاقة

$$(\mathrm{KE})_n = \frac{Ze^2k_e}{2r_n} \qquad (27\text{-}7)$$

ويمتلك الإلكترون بالإضافة إلى طاقة حركته ، طاقة وضع كهربية سالبة . ويرجع السبب في كونها سالبة إلى أننا نعرف طاقة وضع شحنتين على أنها تساوى الصفر عندما تكون المسافة بينهما لانهائية . وكلما اقترب الإلكترون من النواة ، فإنه « ينحدر » بالنسبة لطاقة الوضع لأن النواة تجذبه ، أى أنه يتحرك نحو طاقات وضع أقل من الصفر أى سالبة . وطاقة وضع إلكترون يقع على مسافة r_n من شحنة موجبة Ze هى

$$(\mathrm{PE})_n = \frac{-Ze^2k_e}{r_n} \qquad (27\text{-}8)$$

فإذا أضفناها إلى طاقة حركة الإلكترون فى المدار رقم n (المعادلة 7-27) فإننا نحصل على الطاقة الكلية للذرة فى الحالة المستقرة رقم n :

$$E_n = \frac{-Ze^2k_e}{2r_n} \qquad (27\text{-}9)$$

يلاحظ أن طاقة الذرة سالبة وتصبح أكثر سالبية كلما انخفضت قيمة r_n (وبعبارة أخرى : كلما اقترب الإلكترون من النواة) .

يمكننا الآن كتابة المعادلة (9-27) على صورة أكثر ملاءمة باستخدام المعادلتين (5-27) و (6-27) للتعويض عن قيمة r_n :

$$E_n = -\left(\frac{1}{n^2}\right)\left(\frac{2\pi^2Z^2e^4k_e^2m}{h^2}\right) \qquad (27\text{-}10)$$

وإذا عوضنا عن قيم الثوابت الواردة فى هذه المعادلة فإننا نحصل عندما Z = 1 على :

$$E_n = -\frac{2.18\times10^{-18}\ \mathrm{J}}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2}\,\mathrm{eV} \qquad (27\text{-}11)$$

ومعنى **الطاقة الكلية السالبة** هو أن الإلكترون **مرتبط** بالنواة ، ولو أنه اكتسب ما يكفى من الطاقة من أحد المصادر الخارجية (بالتصادم مثلاً ، حتى تصبح طاقته الكلية موجبة ، فإنه لن يصبح مرتبطاً : بل سيصير حراً .

ولنتذكر أن كل قيمة من قيم n تناظر حالة مستقرة واحدة للذرة . فالحالة $n = 1$ ، فى إطار النموذج شبه الكلاسيكى ، تناظر إلكترونا يدور فى أصغر مدار ممكن له r_1 . وتسمى طاقة الذرة فى هذه الحالة ، **الحالة الأرضية** وهى تساوى $E_1 = -13.6\ \mathrm{eV}$ ، ولما كانت النظم إذا خلى بينها وبين أية مؤثرات خارجية تميل إلى الهبوط إلى أدنى طاقة ممكنة ، فإن ذرات الهيدروجين توجد عادة فى الحالة $n = 1$. وعندما $n = 2$ ، وهى تناظر حالة الطاقة الأعلى التالية ، فإن نصف قطر المدار (من المعادلة 5-27) يصبح $4r_1$ ، وعندئذ تصبح طاقة الذرة هى :

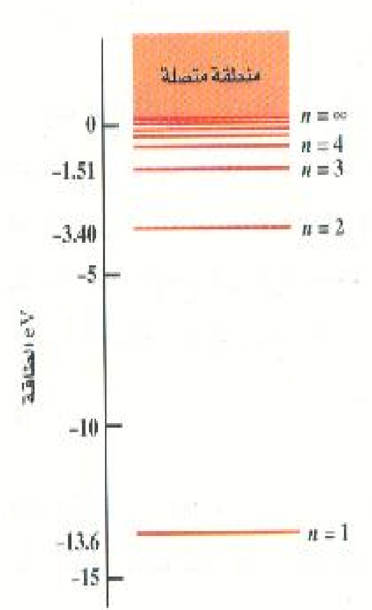
$$E_2 = -\frac{13.6}{2^2}\,\text{eV} = -3.4\ \text{eV}$$

يلاحظ هنا أن E_2 أكبر من E_1 ، بمعنى أن طاقة الذرة فى الحالة 2 أعلى من طاقتها فى الحالة 1 . وسنكتب على سبيل الإيجاز :

$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{و} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2}\,\text{eV} \qquad (27\text{-}12)$$

وكما هو واضح فإن طاقات الإلكترون فى الذرة مكماة مثلما كانت حالة الجسيم المحصور داخل أنبوبة .

من المناسب دائمًا أن نمثل طاقات النظم المكماة (كالذرات مثلاً) على هيئة ما يسمى **الرسم البيانى لمستويات الطاقة** ؛ وبالنسبة لذرة الهيدروجين فإنه موضح بالشكل 7-27 . وهو بمثابة مقياس رأسى للطاقة مع خطوط أفقية مرسومة بحيث تناظر طاقات الحالات المستقرة للذرة . وقد بينّا عدة مستويات أولى فقط ، لأن تلك المستويات تصير عند قيم n الأعلى من ذلك متلاصقة لدرجة يصعب معها رسمها . ويتضح هذا من حقيقة أن كل المستويات بدءًا من $n = 3$ حتى $n = \infty$ لابد أن تقع داخل فجوة صغيرة بين -1.51 eV والصفر . وحيث أن نصف قطر المدار يتزايد بسرعة بزيادة n فإن الإلكترون يصير متحررًا من النواة تمامًا عند $n = \infty$ ، وتصير الذرة عندئذ مؤيَّنة .



شكل 7-27:
الرسم البيانى لمستويات طاقة الهيدروجين . هناك عدد لا نهائى من المستويات فيما بين $n = 4$ و $n = \infty$.

نلاحظ أن هناك منطقة مميزة بالتعبير **منطقة متصلة** ، وتقع لطاقات أكبر من الصفر . وعند قيمة $n = \infty$ يكون الإلكترون متحررًا من الذرة ويكون ساكنًا . وتكون قيم الطاقة الأعلى بمثابة طاقة الحركة الانتقالية للإلكترون الحر . ولكن هذه الطاقة ليست مكماة ولذلك فإن جميع قيم الطاقة فوق $E = 0$ تكون متاحة .

مثال 27-1

ما مقدار الطاقة اللازم لتأيين ذرة هيدروجين موجودة عند حالتها الأرضية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : مم تتكون عملية التأين ؟

الإجابة : تتكون من تحرير الإلكترون من الذرة.

سؤال : ماذا يعنى هذا بدلالة طاقة الإلكترون ؟

الإجابة : يعنى أن نعطى الإلكترون ما يكفى من الطاقة حتى تصبح $E_{tot} \geq 0$. وطاقة التأين هى الطاقة اللازمة لجعل $E_{tot} = 0$.

الحل والمناقشة : يبين الشكل 7-27 أن الحالة الأرضية ($n = 1$) ذات طاقة $E_{tot} = -13.6$ eV ، أى أن هذا المقدار $+13.6$ eV هو أدنى طاقة لازمة لتأيين الذرة .

27-4 انبعاث الضوء من الهيدروجين

تتواجد ذرات الهيدروجين عادة فى أدنى حالات الطاقة عندما $n = 1$! ويقال عنها

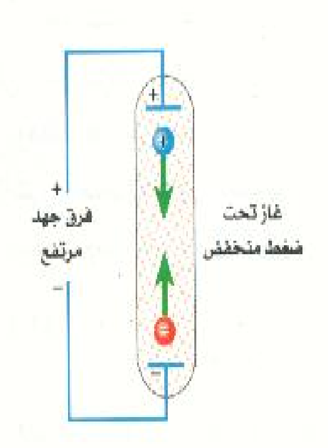
عندئذ إنها غير مستثارة . إلا أنك إذا قذفت الذرات بجسيمات كالإلكترونات أو البروتونات ، فإن التصادمات كفيلة باستثارتها . وبعبارة أخرى قد يمد التصادم الذرة بما يكفى من الطاقة لنقلها من الحالة الأرضية إلى حالة مستقرة أعلى .

وفرق الطاقة بين الحالتين $n = 1$ و $n = 2$ ، كما هو واضح من الشكل 7-27 بالنسبة للهيدروجين هو :

$$E = E_2 - E_1 = 13.6 - 3.4 = 10.2\ \text{eV}$$

أى أن الجسم المقذوف لابد أن تكون لديه طاقة مقدارها 10.2 eV حتى يتمكن من استثارة الذرة من الحالة $n = 1$ إلى الحالة $n = 2$. وبنفس الطريقة نجد أنه لاستثارة الذرة من الحالة $n = 1$ إلى الحالة $n = 3$ تلزم طاقة مقدارها .

$$E = E_3 - E_1 = 13.6 - 1.51 = 12.1\ \text{eV}$$



شكل 8-27:
يقوم فرق الجهد المرتفع عبر أنبوبة التفريغ بجعل الإلكترونات الحرة والأيونات تتحرك داخل الأنبوبة تحت تأثير عجلة تسارع . فإذا كان فرق الجهد كبيرًا بما يكفى فإن هذه الشحنات المتحركة ستقوم بتأيين ذرات أخرى عند التصادم معها .

ومن الطرق الشائعة لاستثارة ذرات غاز ما (راجع الشكل 8-27) أن نطبق عليه فرق جهد مرتفع وهو تحت ضغط منخفض . ويحتوى الغاز عادة على قليل من الإلكترونات الحرة والأيونات (نتيجة للنشاط الإشعاعى الطبيعى والأشعة الكونية - راجع الفصل الثامن والعشرين) ، ويتم تعجيل هذه الإلكترونات والأيونات فى فرق الجهد فتتصادم مع ذرات الغاز مولدة بهذا انهمارًا من الجسيمات المشحونة . ويصبح الغاز فى الأنبوبة - التى تسمى **أنبوبة تفريغ** - محتويًا على عدد كبير من الذرات المؤينة والمستثارة إلى درجة كبيرة . ومن النماذج على تلك الأنابيب مصابيح إعلانات غاز النيون ومصابيح الفلورسنت . ولعلك تعلم أن تلك الأنابيب تنتج ألوانا مميزة للأضواء . وسنوضح فيما يلى السبب فى أن أنبوبة تفريغ غاز الهيدروجين لابد أن ينبعث منها الضوء .

تميل الذرات - شأنها فى هذا شأن جميع النظم الفيزيائية - إلى الهبوط إلى أدنى حالة من حالات الطاقة الممكنة . وتفقد الإلكترونات المستثارة فى ذرات الهيدروجين طاقاتها تلقائيًا وتهبط بذلك إلى حالات ذات طاقات أدنى . فقد يهبط إلكترون مستثار فى الحالة $n = 3$ ، مثلا ، إلى الحالة $n = 2$ ، وبذلك يفقد بصورة أو بأخرى ، فرق الطاقة بين هاتين الحالتين ، وهو $3.4 - 1.5 = 1.9\ \text{eV}$. من الممكن أن تفقد الذرة هذا المقدار من الطاقة من خلال تصادمات متبادلة مع الذرات الأخرى . ويتجلى معظم الطاقة التى تفقد بهذه الطريقة فى النهاية فى صورة طاقة حرارية . إلا أن هناك وسيلة أخرى ؛ يمكن بها للذرة أن تتخلص من الطاقة الزائدة ؛ إنها تستطيع أن تشع فوتونًا .

افترض أن ذرة هيدروجين تقوم بإشعاع فوتون عندما يسقط إلكترونها من المستوى $n = j$ إلى المستوى $n = i$. إن الفرق بين طاقتى هذين المستويين $E_j - E_i$ لابد أن يكون مساويًا لطاقة الفوتون الذى تم إشعاعه ولكن طاقة الفوتون هى hc/λ ، ولذا يكون لدينا :

$$\text{طاقة الفوتون} = hc/\lambda = E_j - E_i$$

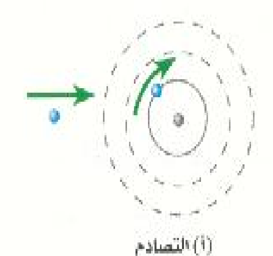
وإذا ما لجأنا إلى المعادلة (27-10) للتعويض بقيم كل من E_i و E_j فإن :

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{2\pi^2Z^2e^4k_e^2m}{h^3c}\left(\frac{1}{i^2}-\frac{1}{j^2}\right) \qquad (27\text{-}13)$$

يلاحظ هنا أن المعادلة (13-27) تتخذ نفس الشكل الذى رأيناه فى المعادلات التجريبية لسلاسل ليمان وبالمر وغيرها . وعند مقارنة المعادلة (1-27) مع (13-27) فسنجد أن ثابت ريدبرج R الذى تم تعيينه بالتجربة لابد أن يتساوى مع المعامل الوارد بالمعادلة (13-27) عند وضع $Z = 1$ (أى للهيدروجين) :

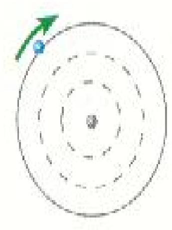
$$R=\frac{2\pi^2e^4k_e^2m}{h^3c}$$

يضم هذا التعبير الرياضى على مالا يقل عن **خمسة ثوابت فيزيائية** أساسية ولعله يجدر بك أن تقوم بإجراء الحسابات المؤدية إلى إيجاد قيمة $R = 1.0974 \times 10^7\ m^{-1}$ وقد كانت هذه النتيجة من الإنجازات المدهشة لنظرية بوهر التى كانت فى تلك الأيام تستقر على أسس فيزيائية واهية .



(أ) التصادم

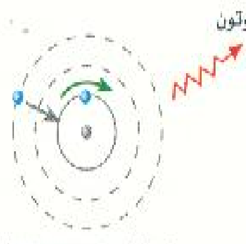
وهكذا تقدم لنا المعادلة (13-27) تفسيرًا لطيف الهيدروجين فى إطار تغيرات طاقة الإلكترون عندما يقفز بين الحالات المستقرة المتاحة . ويمكننا أن نكتب الصورة العامة للأطوال الموجية المسموح بها كالآتى :



(ب) ذرة مستثارة

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{i^2}-\frac{1}{j^2}\right) \qquad (27\text{-}14)$$

افترض ـ مثلاً ـ أن التصادم قد دفع بالإلكترون إلى المدار $n = 3$ ، كما هو واضح فى الشكل 9-27 . إذا هبط الإلكترون مرتدًا إلى المدار $n = 1$ ، فإن أحد الفوتونات سينطلق حاملا معه الطاقة المفقودة ، وبالاستعانة بالمعادلة (14-27) نصل إلى :



(جـ) العودة إلى الحالة الأرضية مع إطلاق طاقة

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{3^2}\right)$$

شكل 9-27:
ذرة هيدروجين فى الحالة الأرضية $n=1$ عندما تستثار إلى الحالة $n=3$. إنها تبعث فوتونًا عندما تهبط إلى الحالة الأرضية مرة أخرى (لاحظ أن المدارات ليست مرسومة بمقياس رسم حقيقى) .

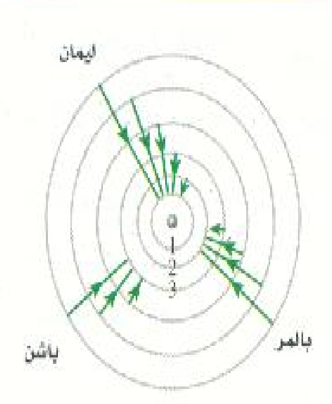
التى يتضح أنها تعطى الخط الثانى فى سلسلة ليمان . ويمكننا فى الواقع ، أن نحصل على سلسلة ليمان كلها إذا جعلنا $i = 1$ و $j = 2, 3, 4, \ldots$ فى المعادلة (14-27) ، **تنبعث سلسلة ليمان من خطوط الطيف عندما يهبط الإلكترون من المدارات الخارجية إلى المدار $n = 1$.**

وبالمثل ، إذا هبطت الإلكترونات من المدارات الخارجية إلى المدار $n = 2$ ، فإننا نحصل على سلسلة من الأطوال الموجية كالتالى :

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{j^2}\right) \qquad j = 3, 4, \ldots$$

وهى المعروفة بسلسلة بالمر . أى أن **سلسلة بالمر من الخطوط الطيفية تنبعث عندما تهبط الإلكترونات إلى المدار $n = 2$** . وكما قد تتوقع فإن سلسلة باشن تنشأ من الانتقالات إلى المدار $n = 3$. ويلخص الشكل 10-27 هذه الحقائق حيث ترى بعض الانتقالات الممكنة فقط .

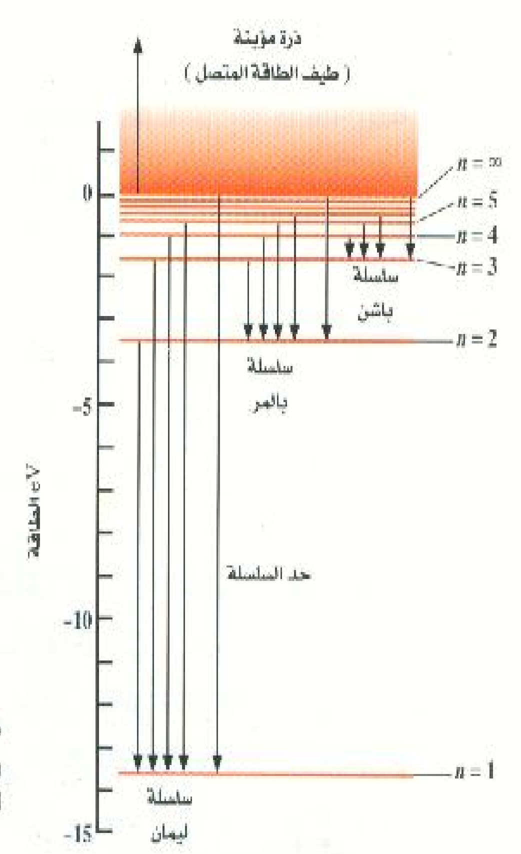
يقل الفرق فى الطاقة بين المستويات المختلفة بسرعة ، كلما تناولنا مستويات أعلى فأعلى . وعلى ذلك ، فإن الطاقة المنبعثة عندما يهبط الإلكترون من المدار 10 إلى المدار 2 ، لا تكاد تختلف عن الطاقة المنبعثة عندما يهبط من المدار 100 إلى المدار 2 . ومعنى هذا أن الخطوط فى سلسلة بالمر تصبح متقاربة جدًا من بعضها البعض كلما أخذنا فى تناول الأطوال الموجية المنبعثة نتيجة الانتقالات من المدارات الخارجية إلى المدار 2 . ومن الطبيعى أن أكبر قدر من الطاقة سينبعث إذا هبط الإلكترون من خارج الذرة ($n = \infty$) إلى المدار $n = 2$ ؛ وهذا يقودنا إلى انبعاث الطول الموجى لحد السلسلة .



شكل 10-27:
أصل السلاسل الطيفية المختلفة للهيدروجين (المدارات ليست مرسومة بمقياس رسم حقيقى) .

ولمزيد من الإيضاح حول أصل هذه السلاسل الطيفية ، نشير إلى الشكل 7-27 مرة أخرى ، والذى سنعيد رسمه فى الشكل 11-27 ، مع إضافة خطوط رأسية ذات أسهم تبين الانتقالات الإلكترونية الممكنة . وهناك طريقة تجعلنا ندرك من لمحة واحدة كيفية تغير الأطوال الموجية للخطوط المنبعثة . إن طاقة الانتقال تتناسب مع طول الخط الرأسى ذى السهم المناظر لذلك الانتقال . ومن ثم تكون أسهم سلسلة ليمان (وليست كل الخطوط مبينة هنا) أطول من تلك المناظرة لسلسلة بالمر ، مما يدل ـ على الفور ـ على أن الأطوال الموجية لسلسلة ليمان أقصر . ونستطيع أن ندرك بسهولة أيضًا من هذا الرسم البيانى أن خطوط الطيف فى سلسلة تناظر الانتقالات من قيم أعلى للعدد n ، سوف تكون متلاصقة جدًا مع بعضها البعض ، وذلك لأن لمستويات الطاقة هذه قيم تكاد تكون متساوية .

تمرين : احسب قيمة R إذا علمت قيم كل من m ، k_e ، h ، c و e . استخدم القيم إلى أربعة أرقام معنوية .



شكل 11-27:
رسم بيانى لمستويات الطاقة المناظرة لمختلف السلاسل الطيفية للهيدروجين .

مثال توضيحى 1-27

أوجد الطول الموجى للخط الرابع فى سلسلة باشن .

استدلال منطقى : نعلم أن سلسلة باشن تنشأ من الانتقالات إلى الحالة $n = 3$ (بالشكل 11-27) . ويحدث الخط الرابع عندما تهبط الذرة من الحالة $n = 7$. ومن ثم نحصل من المعادلة (14-27) على ،

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{7^2}\right)$$

وبالتعويض عن قيمة $R = 1.0974 \times 10^7\ m^{-1}$ ، نجد أن $\lambda = 1005\ nm$ ، وهو طول موجى يقع فى المنطقة دون الحمراء القريبة .

تمرين : ما هو الطول الموجى للخط الثانى فى سلسلة باشن ؟ **الإجابة** : 1281 nm .

مثال 2-27

الهليوم وحيد التأين هو ذرة هليوم فقد منها أحد إلكترونيها ، ولهذا قد نستطيع اعتبار الإلكترون المتبقى ، يسلك مسلك إلكترون ذرة الهيدروجين . (أ) ارسم رسمًا بيانيًا لمستويات طاقة هذا الأيون ، مماثلاً للشكل 11-27 . (أ) أوجد الطول الموجى للخط الأول فى سلسلة بالمر الخاصة به .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الفرق بين هذا الأيون وذرة الهيدروجين ؟

الإجابة : للهليوم بروتونان داخل نواته ولذلك $Z = 2$ ، والمعادلة (12-27) تشير إلى أن طاقة الإلكترون تعتمد على Z^2 . وحيث أن $Z = 2$ فإن كل طاقة من طاقات الهيدروجين لابد أن تضرب فى 4 .

سؤال : ما هى معادلة مستويات الطاقة فى الهليوم المؤين ؟

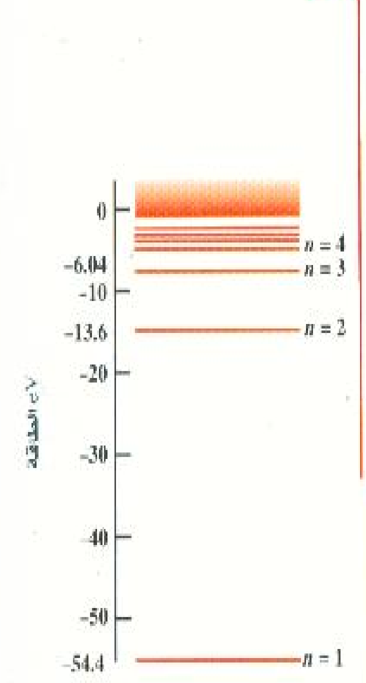
الإجابة : $E_n = 4\frac{-13.6\ eV}{n^2} = \frac{-54.4\ eV}{n^2}$

سؤال : ما الذى يحدد سلسلة بالمر للأطوال الموجية ؟

الإجابة : انتقالات الطاقة التى تنتهى عند الحالة $n = 2$.

الحل والمناقشة : تدل القيمة السابقة للطاقة E_n على أن طاقة تأين الإلكترون الوحيد المتبقى هى 54.4 eV . وعلاوة على ذلك ، فأول حالة مستثارة ($n = 2$) ترتبط بنفس الطاقة التى لإلكترون الهيدروجين ، 13.5 eV . ويلخص الشكل 12-27 مستويات الطاقة .

إن أول خط (أطول طول موجى) فى سلسلة بالمر هو الذى يناظر الانتقال من $n = 3$ إلى $n = 2$. والطاقة المفقودة فى هذه الحالة هى $-6.04\ eV-(-13.6\ eV)$ أو 7.6 eV وذلك بالرجوع إلى الشكل 12-27 . وعلى هذا يكون الطول الموجى للفوتون المنبعث هو :



شكل 12-27: الرسم البيانى لمستويات طاقة ذرات هليوم وحيدة التأين .

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

$$= \frac{(6.63\times10^{-34}\ \text{J.s})(3\times10^{8}\ \text{m/s})}{(7.6\ \text{eV})(1.6\times10^{-19}\ \text{J/eV})} = 163\ \text{nm}$$

وهو يقع فى الجزء البعيد من المنطقة فوق البنفسجية من الطيف .

والطريقة الثانية لإيجاد هـذا الطول الموجى هـى باستخدام المعادلة 14-27 وذلك بوضع $R = 1.0974\times10^{7}\ \text{m}^{-1}$. لماذا كان وضع الرقم 4 ضروريًا ؟

تمرين : أوجد حد الطول الموجى لسلسلة باشن للهليوم وحيد التأين .

الإجابة : 205 nm .

5-27 طيف امتصاص الـهيدروجين

إن الذرات لا تبعث فقط بالضوء وإنما تمتصه أيضًا . ولكى نتعرف على امتصاص الضـوء ، سنقوم بفحص مـا يحـدث خلال التجربة المرسومة فى الشكل 13-27 (أ) . حيث تخترق حزمة من الضوء فوق البنفسجى ، أنبوبة مملوءة بذرات الـهيدروجين . تحتـوى الحزمة الساقطة على طيف مستمر (أى على مدى متصل من الأطوال الموجية) كمـا هـو موضح بالشكل 13-27 (ب) . إلا أن أطوالاً موجية محددة ستختفى كما هو مشـاهد من الحزمة النافذة ، ولذلك يبدو الطيف كما يصـوره الشكـل 13-27 (جـ) عندمـا يفحـص الضوء النافذ بواسطة إسـبكتروجراف (مطيـاف) . ونـود الآن أن نكتشـف أى الأطـوال الموجية تم امتصاصه من جانب ذرات الـهيدروجين .

(أ) تجربة امتصاص

(ب) حزمة ساقطة (طيف مستمر)

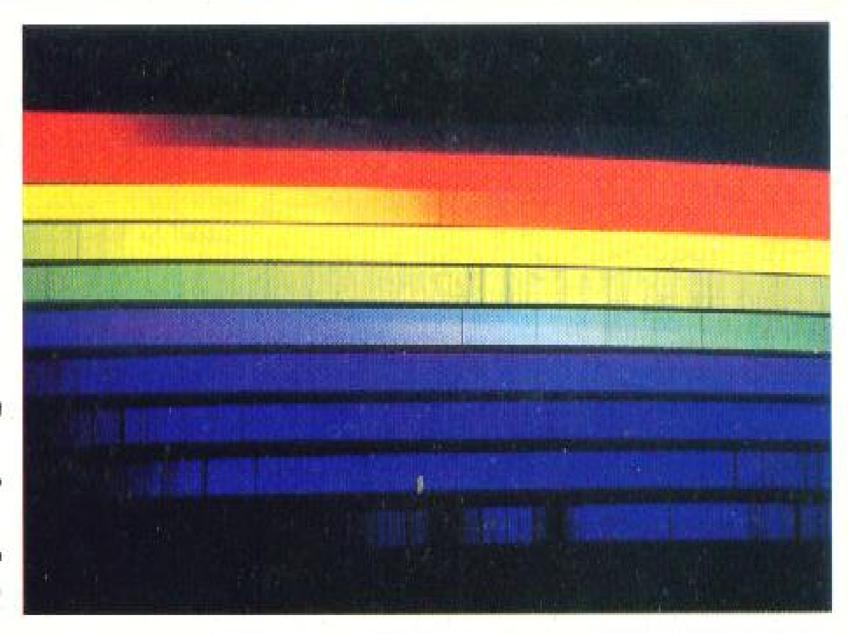
(جـ) حزمة نافذة (طيف امتصاص)

شكل 13-27: تمتص ذرات الهيدروجين أطـوالا موجيـة محددة فقط من الطيف المسـتمر السـاقط عليها . ما هى تلك الأطوال الموجية ؟

ولعمل هذا ، علينا أن نفحص ما يحدث عندما تتصادم الفوتونـات التـى تحملـها الحزمة الساقطة مع ذرات الـهيدروجين . إن الذرات تكون فى الحالـة الأرضيـة لـها فى الظروف العادية . وعندما يرتطم فوتون بإحدى الذرات ، فإن الفوتون إما أن يفقـد كل طاقته أو لا يفقد شيئًا على الإطـلاق* . وبعبـارة أخـرى ، فـإن الفوتـون لا يمكـن امتصاصه جزئيًا . والعامل الأساسى الذى يحدد إمكانية حدوث أى من هـاتين العمليتـين هو ما يلى : عندما تكون طاقة الفوتون الذى يصطدم بالإلكـترون مساوية تمامًا لفرق الطاقة بين المستوى $n = 1$ ومستوى آخر ، فإن الفوتون سيُمتص ، وإلا فإنه لابد أن يظل محتفظًا بطاقته الأصلية .

والسبب فى هذا بسيط للغاية . فحيث أن الإلكترون فـى ذرة الـهيدروجين لا يمكنـه إلا احتلال أحد مستويات الطاقة المحددة لذا لا يمكنه أن يتلقى إلا مقادير الطاقة اللازمـة لنقله من أحد المستويات إلى الآخر . وتنتمى هذه الانتقالات كما يوضح الشكـل 11-27 إلى الطاقات التى تناظر ظهور سلسلة خطوط ليمان (فى حالة الانبعاث) . وعلى ذلك سيكون

* سوف نتجاهل أثر كومتون (القسم 9-26) فى هذه المناقشة لأنه ذو قيمة مهملـة إلى جـانب الأثـر الذى نحن بصدده هنا .



يظهر فى طيف الضوء المنبعث من الشمس ، الكثير من الخطوط الداكنة ، مما يشير إلى الأطوال الموجية التى امتصتها ذرات الغلاف الجوى للشمس من الطيف المستمر المنبعث من الغلاف الضوئى للشمس .

للفوتونات التى طولها الموجى مساوٍ لنفس الطول الموجى للخط الأول من سلسلة ليمان (121.6 nm) ما يكفى من الطاقة لاستثارة الذرة من المستوى $n = 1$ إلى المستوى $n = 2$ وهكذا يتم امتصاصها بواسطة الذرة .

وبالمثل يتم امتصاص الفوتونات التى أطوالها الموجية مكافئة لأى من الخطوط الأخرى فى سلسلة ليمان ، بواسطة ذرات الهيدروجين ذات المستوى الأرضى ولن يتم امتصاص فوتونات ذات أطوال موجية متوسطة لأن طاقاتها لن تكون مناظرة لأحد الانتقالات الإلكترونية الممكنة . على أن الفوتونات ذات الأطوال الموجية الأقل من سلسلة ليمان ، وهو 91.2 nm ، يمكن أن تمتص . إذ إن لهذه الفوتونات ما يكفى من الطاقة لكى تستثير إلكترونًا إلى داخل منطقة مستويات الطاقة المتواصلة (المستمرة) حيث $E_{tot} \geq 0$. وتقوم الفوتونات التى لها هذا القدر الوافر من الطاقة بانتزاع الإلكترون تمامًا من الذرة (أى أنها تؤين الذرة) ثم تعطى الإلكترون المحرر طاقة حركة إضافية . ويتشابه هذا النوع من عمليات امتصاص الفوتون مع الانبعاث الكهروضوئى للإلكترونات من جسم صلب ، ويشار إليه على أنه **الأثر الكهروضوئى الذرى** .

يمكننا الآن ، بناءً على ما قيل ، أن نتنبأ بما سيحدث عندما يخترق طيف مستمر من الإشعاع غازًا من الهيدروجين الذرى . ستمر معظم الأطوال الموجية دون امتصاص لأن فوتوناتها لا تمتلك الطاقات المناسبة لاستثارة الذرة نحو حالة طاقة مسموح بها . إلا أن الأطوال الموجية المناظرة لخطوط فى سلسلة ليمان سيتم امتصاصها لأن الفوتونات المناظرة تمتلك الطاقة المناسبة لاستثارة الذرة نحو حالة طاقة مسموح بها . وسوف نطلق على مثل طيف الامتصاص هذا **طيف الامتصاص الخطى** . وكل الأطوال الموجية الأقصر من حد سلسلة ليمان سوف يتم امتصاصها ، لأن هذه الفوتونات سوف تؤين الذرة وتحمل الإلكترون إلى داخل منطقة الطاقة المتصلة . ويطلق على الامتصاص فى هذه المنطقة من الأطوال الموجية ، وهى بالمناسبة ليست مبينة فى الشكل 13-27 ، **طيف الامتصاص المستمر** ، لأن الامتصاص يشمل مدى مستمرًا من الأطوال الموجية .

علينا في النهاية ملاحظة أن خطوط الامتصاص التي تناظر خطوط سلسل بالمر لا توجد إلا إذا كانت ضعيفة للغاية . والسبب في هذا هو ما يلي . إن سلسلة بالمر تنتج كما نعلم من الانتقالات بين الحالة $n = 2$ والحالات الأعلى . وحيث أن عددًا قليلاً من الإلكترونات هو الذي يحتل الحالة $n = 2$ ، فإن عددًا قليلاً جدًا من الذرات هو الذي يكون قادرًا على تحقيق الحالة التي يقتلع فيها إلكترون من الحالة $n = 2$ إلى حالات أعلى . ولهذا فإن الفوتونات التي تناظر هذه الطاقات لن يتم امتصاصها بقوة . ومن الطبيعة أنه عندما يكون غاز الهيدروجين مستثارًا بدرجة كبيرة ، فإن الموقف يكون أكثر ملاءمة لاكتشاف الامتصاص عند الأطوال الموجية لسلسلة بالمر . لماذا ؟

مثال 27-3

عندما تستثار ذرة هيدروجين عن طريق امتصاص فوتون فوق بنفسجي ، فإن الذرة تستطيع أن تشع بعد ذلك ضوءًا به أطوال موجية متنوعة تعتمد على الطريقة التي يعود بها الإلكترون إلى الحالة الأرضية . اعتبر مثلاً ، أن ذرات الهيدروجين قد امتصت فوتونًا طوله الموجي $\lambda = 97.23$ nm . ما هي الأطوال الموجية (بخلاف الطول الموجي 97.23 nm) التي يمكن لهذه الذرات أن تبعثه فيما بعد ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هو المبدأ الذي يحدد الطول الموجي المنبعث من الذرة ؟

الإجابة : إنه مبدأ بقاء الطاقة . إن ما يحدد طاقات الفوتونات المنبعثة هي الطاقات التي قد يفقدها الإلكترون عندما يقفز من حالة مستثارة إلى حالات أشد ترابطًا بالنواة .

سؤال : كيف يمكنني إيجاد n الخاصة بالحالة المستثارة من عملية امتصاص الفوتون ؟

الإجابة : بالنسبة لسلسلة ليمان : $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{n^2}\right)$ ونستطيع من هذه العلاقة إيجاد n التي تناظر $\lambda_n = 97.23$ nm .

سؤال : ما الذي يحدد الانتقالات الإلكترونية التي ينتج عنها فوتونات ؟

الإجابة : لابد أن تكون الانتقالات إلى قيم n الأقل وتستمر إلى أن يصل الإلكترون إلى $n = 1$. ولن يدخل في الحساب طبعًا الانتقال المباشر إلى $n = 1$ والذي يعيد انبعاث الفوتون 97.23 nm .

الحل والمناقشة : يمكننا إيجاد الحالة المستثارة التي تناظر الفوتون 97.23 nm إذا أعدنا ترتيب معادلة سلسلة ليمان على النحو التالي :

$$\frac{1}{n^2} = 1 - \frac{1}{R\lambda_n}$$

$$= 1 - \frac{1}{(1.097 \times 10^7\ \text{m}^{-1})(0.9723 \times 10^{-7}\ \text{m})} = 0.0625$$

$$n^2 = 16.0 \quad , \quad n = 4$$

ويمكن للفوتونات أن تنبعث من هذه الحالة عندما يقوم الإلكترون بالانتقالات التالية :

1 من $n = 4$ إلى $n = 3$

2 من $n = 4$ إلى $n = 2$

3 من $n = 3$ إلى $n = 2$

4 من $n = 3$ إلى $n = 1$

5 من $n = 2$ إلى $n = 1$

الانتقال رقم (1) هو أول خط من مجموعة (سلسلة) باشن تحت الحمراء ، أما (2) و (3) فتمثل خطين من سلسلة بالمر المرئية ، وتنتمي (4) و (5) إلى سلسلة ليمان فوق البنفسجية .

وعلى هذا تكون مستويات الطاقة هي $E_1 = -13.6$ eV، $E_2 = E_1/4 = -3.4$ eV ، $E_3 = E_1/9 = -1.51$ eV و $E_4 = E_1/16 = -0.85$ eV . وفيما يلي نعرض تغيرات الطاقة المصاحبة للانتقالات وما يناظرها من الأطوال الموجية للفوتونات :

1 $\Delta E = 0.66$ eV $\qquad \lambda = \dfrac{hc}{\Delta E} = 1879$ nm

2 $\Delta E = 2.55$ eV $\qquad \lambda = 486$ nm

3 $\Delta E = 1.89$ eV $\qquad \lambda = 656$ nm

4 $\Delta E = 12.1$ eV $\qquad \lambda = 103$ nm

5 $\Delta E = 10.2$ eV $\qquad \lambda = 122$ nm

27-6 النظرية الموجية للذرة

تتنبأ نظرية بوهر - كما شاهدنا - بمستويات الطاقة الصحيحة لذرة الهيدروجين . كما أنها تفسر الطيف الذى تبعثه ذرات الهيدروجين أو تمتصه . وقد أمكن - باستخدام الخواص الموجية للإلكترون - أن نجد تبريرًا لفرض بوهر الذى يقتضى وجود الإلكترون فى حالات مستقرة معينة فحسب . وكان بوهر قد افترض أن تلك الحالات المستقرة تتكون من مدارات دائرية تحيط بالنواة . وقد يكون من الأحسن أن نبدأ بمعادلة شرودنجر (القسم 12-26) التى تصف سلوك موجات دى بروى وأن نعين الحلول الرنينية لإلكترون ما موجود فى نطاق جهد كولوم للنواة .

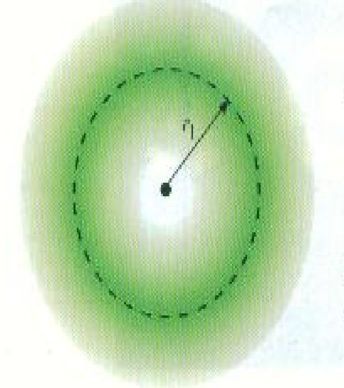
ولعلنا نذكر من القسم 13-26 أن رنين موجات جسيم داخل أنبوبة كفيل بأن يدلنا على المكان الذى يحتمل (أو لا يحتمل) وجود الجسيم فيه . وكان كل رنين يتميز بعدد كمى يتمثل برقم من 1 إلى ∞ . ويتضح من هذا أن حالات الرنين تتطلب - فى حالة الأبعاد الثلاثية - وجود ثلاثة أرقام كمية لكى يمكن تمييز شكلها ؛ ولذلك كان علينا أن نتوقع تميز أشكال رنين ذرة الهيدروجين بثلاثة أرقام كمية وليس برقم منفرد كالذى استخدمناه عند تناول نظرية بوهر . وحتى مع هذا فإن أشكال الرنين لابد أن تدلنا على الموقع الذى يحتمل تواجد الإلكترون فيه ، عندما تكون الذرة فى حالة رنين معينة .

دعنا الآن نناقش النتائج التى يتم الحصول عليها بالنسبة لذرة الهيدروجين عندما تستخدم معادلة شرودنجر لإيجاد الحالات الرنينية لتلك الذرة .

تقدم النظرية الموجية لذرة الهيدروجين نفس مستويات الطاقة التى أوجدناها فيما سبق :

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\ \text{eV}$$

وتؤكد هذه النتيجة أن ما أسفرت عنه النظرية الموجية سوف يتنبأ بطيف الهيدروجين المشاهد عمليًا ؛ حيث تتميز كل حالة من حالات الطاقة برقم أو عدد كمى n سنسميه **العدد الكمى الأساسى** .



شكل 14-27:
يتواجد الإلكترون الخاص بذرة الهيدروجين التى فى حالتها الأرضية ، بأكبر قدر من الاحتمال ، داخل قشرة كروية مشوشة تتمركز حول النواة . ويصور الشكل مقطعًا مستعرضًا للقشرة يمر بالنواة . ويكون احتمال وجود الإلكترون أكبر ما يمكن حيث تكون الظلال أكثف ما يمكن .

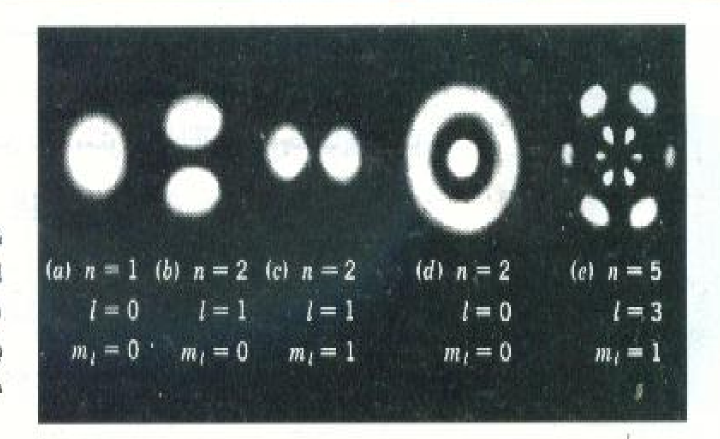
يختلف الشكل الرنينى المناظر للعدد $n = 1$ بشكل جوهرى عن المدار الدائرى الذى افترضه بوهر للحالة $n = 1$ ، ويتضح أن للإلكترون احتمال محدد لأن يتواجد فى بقعة ما داخل قشرة دائرية مشوشة تتمركز حول النواة . ويوضح لنا الشكل 14-27 مقطعًا مستعرضًا لهذه القشرة ، أما الإلكترون فأكبر احتمال لوجوده حيث الظلال أكثف ما يمكن . وعلى الرغم من أن أكبر احتمال لوجود الإلكترون هو على مسافة نصف القطر r_1 من النواة إلا أن لدى الإلكترون بعض الاحتمال فى أن يتواجد فى أى بقعة من المنطقة المظللة . وعليك أن تكون واثقًا من فهمك لمدى اختلاف هذه النتيجة عن مفهوم بوهر الذى يقتضى مدارًا دائريًا واحدًا . أما النظرية الموجية فتستبدل بهذا المدار الدائرى قشرة كروية ولا تحصر - بالإضافة إلى ذلك - الإلكترون عند نصف قطر محدد ، كما أن القشرة مشوشة للغاية . ويصور الشكل 15-27 هذا الأمر بصورة بيانية .



شكل 15-27:
تتنبأ النظرية الموجية بالاحتمالات النسبية الموضحة وهى أن الإلكترون سوف يتواجد عند أنصاف أقطار مختلفة بالنسبة لمركز ذرة الهيدروجين ، عندما تكون فى الحالة الأرضية لها .

والشكل الرنينى الذى تتنبأ به النظرية الموجية للحالة $n = 2$ أعقد بكثير من الحالة $n = 1$ ، حيث يتضح أن هناك ثلاث حالات رنين لها طاقة الحالة $n = 2$ ونستطيع تصور هذه الحالات الرنينية وتلك المناظرة لأعداد كمية n أكبر من ذلك ، بواسطة رسوم بيانية توضح فرصة وجود الإلكترون فى مواقع مختلفة فى الذرة . ولا تصور هذه الرسوم ، ويطلق عليها **المسارات أو المدارات** ، الإلكترون على أنه يتحرك فى مسار كما فى نموذج بوهر شبه الكلاسيكى . يوضح الشكل 16-27 بعض هذه المدارات فى الحالات $n = 1, 2, 5$ وذلك فى بعدين . ومن الممكن الحصول على صورة ثلاثية الأبعاد إذا تمت إدارة هذه الأشكال حول محور رأسى يمر بمركزها ، وسوف تشير شدة استضاءة الشكل عند نقطة ما إلى الاحتمال النسبى لوجود الإلكترون عند تلك النقطة . إذا ما تناولنا قيما أكبر للعدد n ، فإن المدارات تصبح معقدة تمامًا كما يصور ذلك الشكل 16-27 هـ .

وهكذا نرى مما تقدم أن نظرية بوهر ما هى إلا تبسيط مبالغ فيه لسلوك الإلكترون فى ذرة الهيدروجين ، فعلى سبيل المثال ، لا يوجد سند لمفهوم بوهر عن المدارات الثابتة . ومع ذلك فمستويات الطاقة للذرة قد تم التنبؤ بها بشكل صحيح فى إطار نظرية بوهر ؛ بل إن العدد الكمى الرئيسى n الذى اقترحه بوهر ذو أهمية عظيمة . وعلى الرغم من أننا لابد أن نتمسك دائمًا بتحفظاتنا على نموذج بوهر فى أذهاننا ، إلا أن ذلك النموذج يوفر لنا إطارًا للوصف المنهاجى للذرات ، ولذلك لا نكف عن الإشارة والرجوع إليه .



شكل 16-27:
للحصول على توزيع إلكترونى فى الأبعاد الثلاثة ، لابد من إدارة الأشكال المبينة بالرسم حول محور رأسى يمر بمركز كل منها .

7-27 الأعداد الكمية ومبدأ باولى للاستبعاد

تتواجد ذرة الهيدروجين وإلكترونها ـ كما رأينا ـ في مستويات طاقة محددة ومعلومة ، يميزها عدد صحيح هو n ، وتتحدد بالعلاقة :

$$E_n = \frac{-13.6Z^2}{n^2}\ \text{eV}$$

حيث $Z = 1$ في حالة الهيدروجين . وتتراوح قيمة العدد الصحيح n من 1 إلى مالانهاية كلما اتخذت الذرة قيمًا مسموحًا بها مختلفة للطاقة . وعلى الرغم من توصلنا إلى هذه النتيجة باستخدام نموذج بوهر ، إلا أن الصورة الموجية التى تقوم على حل معادلة شرودنجر ، تؤدى إلى نفس النتيجة . ونرى من ثم أن العدد n ، يمثل بارامترًا أساسيًا وضروريًا لوصف حالة ذرة الهيدروجين . وكما ذكرنا من قبل فإنه يسمى **العدد الكمى الرئيسى** . وهو يميز مستوى الطاقة الذى على الإلكترون أن يتواجد فيه . وقد تصور بوهر أن كل قيمة للعدد n يصاحبها مدار خاص للإلكترون وإن كان قد ثبت عدم وجود سند لهذا ، كما أشرنا فى القسم السابق . ومع ذلك ، فمن الشائع أن يقال أن كل قيمة للعدد n تناظر **قشرة طاقة** معينة (بدلاً من تناظر مدارًا معينًا) تحيط بالنواة . وعندما تكون الذرة فى مستوى الطاقة $n = 3$ ، مثلاً ، فإنه يقال ـ فى العادة ـ أن الإلكترون موجود فى القشرة $n = 3$.

لقد رأينا فى القسم السابق أيضًا أن من الممكن وجود أكثر من شكل من الرنين الموجى بالنسبة لنفس قيمة العدد الكمى الرئيسى . وتنص النظرية الموجية على أن هناك عددين كميين آخرين لابد من تقديمهما حتى يتم تحديد رنين موجى معين داخل الذرة . ويرتبط أحد هذين العددين ، وهو **العدد الكمى المدارى** ، بكمية التحرك الزاوية لإلكترون بوهر فى مداره الرنينى . ويمثل هذا العدد بالحرف l ويمكن أن يتخذ قيمًا صحيحة تبدأ من 0 حتى $(n - 1)$. فعندما يكون $n = 1$ ، مثلاً ، فإن القيم الممكنة بالنسبة للعدد l ستكون محددة بقيمة منفردة وهى $l = 0$. وعندما يكون $n = 2$ ، فإن من الواضح أن l سيتخذ القيمتين 0 و 1 ، حيث أن $n - 1 = 1$ فى هذه الحالة . يلاحظ بالطبع أن l أقل دائمًا من n .

جدول 1-27:

الأعداد الكمية الأربعة للإلكترون

الرئيسى	$n = 1, 2, 3, \ldots.$
المدارى	$l = 0, 1, 2, \ldots. n-1$
المغناطيسى	$m_l = 0, \pm1, \pm2, \ldots, \pm l$
اللف	$m_s = \pm 1/2$

أما العدد الكمي الثالث فيسمى **العدد الكمى المغناطيسى** ، m_l ، ويمكن أن يتخذ القيم $0, \pm 1, \pm 2, \ldots\ldots, \pm l$. ويصف هذا العدد الاتجاهات الممكنة لكمية التحرك الزاوية للإلكترون عندما يتواجد في مجال مغناطيسي خارجي . وعندما يكون $n = 4$ ، مثلاً ، فإن أكبر قيمة ممكنة للعدد l هي 3 ، ويتخذ العدد m_l القيم $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$. وبعبارة أخرى ، فعندما يكون الإلكترون في مستوى الطاقة المناظر للعدد $n = 4$ ، فإن هناك سبعة مدارات ممكنة للعدد $l = 3$. وبالإضافة إلى ذلك ستكون هناك خمسة مدارات ممكنة للعدد $l = 2$ ، وثلاثة مدارات للعدد $l = 1$ ، ومدار واحد للعدد $l = 0$. أى أن الذرة يمكن أن تتواجد في (16) تشكيل إلكتروني رنيني مختلف ، عندما توجد في مستوى الطاقة $n = 4$.

وفي الختام ، هناك شرط كمي للإلكترون نفسه ، فهو يمتلك عزمًا مغناطيسيًا صغيرًا بفضل كونه جسيمًا مشحونًا يدور حول نفسه في حركة مغزلية . ولا يتخذ عزمه المغناطيسي سوى اتجاهين فقط بالنسبة لمجال مغناطيسي خارجي : فهو إما موازٍ له أو موازٍ ومضاد . ويمكننا تمييز هذين الوضعين بأن تعين للإلكترون **عدد لف كمى** ، m_s ، ذى قيمتين ممكنتين هما $\pm 1/2$ ؛ وتمثل الإشارتان الاتجاهين المتاحين وهما الاتجاه الموازى والاتجاه الموازى والمضاد . ويلخص الجدول 1-27 الأعداد الكمية الأربعة اللازمة لوصف حالة إلكترون في ذرة ما . وسوف نطلق على كل مجموعة مكونة من الأربعة أعداد الكمية ، **حالة** إلكترونية للذرة . وسنرى على الفور أن هناك مبدأ بالغ الأهمية ، ينطبق على سلوك الإلكترونات في الحالات المتاحة .

لقد أولى العالم فولفجانج باولي عام 1925 اهتمامه الشديد لأول مرة بتحديد هذه الحالات الإلكترونية ، ورغب في تعميم هذه المفاهيم لتشمل ذرات أخرى غير الهيدروجين . وتوصل إلى الاستنتاج التالى الذى عرف **بمبدأ باولي للاستبعاد** . لكى يتمكن من تعيين حالات محددة للإلكترونات المختلفة في الذرات عديدة الإلكترونات بشكل صحيح .

لا يمكن لإلكترونين في ذرة ما أن يتخذا نفس مجموعة الأعداد الكمية الأربعة أى أنه لا يمكن لإلكترونين أن يتواجدا في نفس الحالة .

إن هذا المبدأ أساسى لفهم التركيب الإلكترونى للذرات ، كما سندرك في القسم التالى .

27-8 الجدول الدورى

لم نتناول حتى الآن - باهتمام - سوى ذرة بها إلكترون واحد فحسب ؛ وهى قد تكون ذرة هيدروجين ، أو ذرة هليوم وحيدة التأين ، أو ذرة ليثيوم ثنائية التأين ، وهكذا . ولكننا الآن في وضع يسمح لنا بدراسة كيفية ترتيب الإلكترونات الإضافية داخل ذرات متعددة الإلكترونات كالتى توجد في الطبيعة ويضمها الجدول الدورى للعناصر . ولكى نفعل هذا ، سنلجأ مرة أخرى - إلى مفهوم القشرات (أو الأغلفة) الإلكترونية التى

تحيط بالنواة ؛ حيث لكل قيمة من العدد n قشرة مصاحبة له . وسنعتبر ـ بالإضافة إلى ذلك ـ أن نفس حالات الرنين التى أوجدناها للذرة ذات الإلكترون الأوحد ، يمكن إجراؤها وصفيًا لذرات أكثر تعقيدًا . ومعنى هذا ، إننا سنستخدم الحالات الإلكترونية التى تتحدد بالأعداد الكمية الأربعة ، والتى تم وصفها فى القسم السابق .

إن السؤال الذى يطرح نفسه الآن هو : « كيف تقوم الإلكترونات بترتيب أنفسها فى الحالات المختلفة ، عندما يكون بالذرة أكثر من إلكترون ؟ » إن ذرة الكربون ـ مثلاً ـ لديها ستة إلكترونات ، ففى أى مستويات الطاقة والحالات الإلكترونية على هذه الإلكترونات أن تتواجد ؟ نستطيع الإجابة على هذا السؤال باستخدام القواعد الثلاث التالية والتى سبق وأن تعرفنا عليها :

1 إن عدد الإلكترونات فى أية ذرة متعادلة ، يساوى العدد الذرى Z لتلك الذرة .

2 جميع الإلكترونات فى ذرة غير مستثارة ، موجودة فى أدنى حالات ممكنة للطاقة . ويقال عندئذ أن الذرة فى حالتها الأرضية .

3 لا يمكن لأى إلكترونين فى ذرة ما أن يتخذا نفس الأعداد الكمية الأربعة (حسب مبدأ باولى للاستبعاد) .

هيا بنا الآن نستخدم هذه القواعد لكى نعين التركيب الإلكترونى للذرات غير المستثارة فى الجدول الدورى .

الهيدروجين (Z = 1)

سيتواجد الإلكترون المنفرد لهذه الذرة فى المستوى $n = 1$ ، وهو أدنى مستوى ممكن للطاقة ، وبهذا لا يكون مبدأ باولى للاستبعاد قد خرق .

الهليوم (Z = 2)

جدول 2-27:

الإلكترون	n	l	m_l	m_s
1	1	0	0	1/2
2	1	0	0	-1/2

يستطيع إلكترونا هذه الذرة أن يتواجدا فى المستوى $n = 1$ ، وذلك لكونهما يستطيعان اتخاذ أعدادًا كمية غير متطابقة كما هو موضح فى الجدول 2-27 ، الذى تندرج به مجموعات الأعداد الكمية الممكنة فقط بالنسبة للمستوى $n = 1$. ولا يمكن لأى إلكترون ثالث أن يتواجد فى هذا المستوى . ويطلق على كل قيمة للعدد n **قشرة طاقة** ، ويقال أن القشرة $n = 1$ تكون ممتلئة إذا احتلها إلكترونان فحسب .

الليثيوم (Z = 3)

جدول 3-27:

الإلكترون	n	l	m_l	m_s
1	1	0	0	1/2
2	1	0	0	-1/2
3	2	0	0	1/2

لهذه الذرة ثلاثة إلكترونات ولذلك لابد للإلكترون الثالث من أن يتجه إلى أعلى قشرة طاقة تالية ، أو التى عندها $n = 2$ (انظر الجدول 3-27) . وحيث أن هذا الإلكترون موجود فى مستوى الطاقة الثانى ؛ فإن ارتباطه بالذرة يكون أضعف من تلك التى فى الحالة $n = 1$. وعلى ذلك يستطيع الليثيوم أن يشارك بإلكترون واحد فى التفاعلات الكيميائية بسهولة ويسر . ولذلك يطلق على الليثيوم ؛ عنصرًا أحادى التكافؤ حسب المصطلحات الكيميائية (أو الذى تكافؤه واحد) .

الذرات التى لـها قيم Z أكبر من 3

هناك عدد قليل من المجموعات الممكنة من الأعداد الكمية عندما تكون $n = 2$ وستجد أنها ثماني مجموعات إذا قمت بعدها (انظر الجدول 4-27)* . ومعنى ذلك أن القشـرة $n = 2$ يمكن أن يتواجد فيها ثمانية إلكترونات . أى أن القشرة لـن تمتلئ تمامًا إلى أن نصل إلى العنصر $Z = 10$ وهو النيون ، الذى يعد خاملاً من الناحية الكيميائيـة لأن قشراتـه ممتلئة . والعنصر الذى يأتى بعده هو الصوديوم $Z = 11$ ، وذرتـه أحاديـة التكـافؤ لأن إلكترونها الحادى عشر سيكون وحيدًا بالقشرة $n = 3$ ومن السهل إبعاده عن الذرة .

وكلما تقدمنا نحو العناصر ذات القيم الكبيرة للعدد الذرى Z فى الجـدول كلمـا قلت جدوى مفهوم القشرات ، ويعود ذلك إلى أن التباعد بين مستويات الطاقـة صغـير نسبيًا عند قيم n الكبيرة . وفى هذه الحالات قد يؤدى التنافر بين الإلكترونـات المختلفـة فـى الذرة ـ أحيانًا ـ إلى وجود طاقات من الكبر بحيث تلغي تأثير فروق الطاقة الموجودة بـين القشرات وعلى الرغم من ظهور هذه المشكلة ، يظل مفهوم القشرة ـ كما ثبت ذلك مفيـدًا للاعتبارات الوصفية .

جدول 4-27:

n	l	m_l	m_s
2	0	0	± 1/2
2	1	0	± 1/2
2	1	+1	± 1/2
2	1	−1	± 1/2

مثال توضيحى 2-27

طبق مبدأ باولى للاستبعاد لكى تعين التوزيع الإلكـترونى فـى الحالـة الأرضيـة للأرجـون $(Z = 18)$ والروبيديوم $(Z = 37)$.

استدلال منطقى : تستوعب القشرتان $n = 1$ و $n = 2$ إلكـترونين وثمانيـة إلكترونـات على الترتيب ، وبذلك تكون عشر إلكترونات متواجدة فى هاتين القشرتين فـى كـل مـن الأرجون والروبيديوم . بالنسبة للقشرة $n = 3$ سيكون هناك ثمانى عشـرة (18) مجموعـة مستقلة من الأعداد الكمية ، كما هو موضح فى الجدول 5-27 ، ولذلك ستملأ الإلكترونات الثمانية المتبقية للأرجون القشرتين الفرعيتين $l = 0$ و $l = 1$ بالمستوى $n = 3$ وعندمـا تقـوم الإلكترونات فى الحالة الأرضية بملأ قشرة أو قشرة فرعية فـإن تلك الإلكترونـات مرتبطـة بقوة مع أنويتها ، مما يجعل الذرة خاملـة مـن الناحيـة الكيميائيـة . والأرجـون هـو أحـد الغازات النبيلة الخاملة كيميائيًا .

أما بالنسبة للروبيديوم فإن أول ثمانية عشر (18) إلكترونًا سـتحتل الحـالات التـى لـهـا نفس الأعداد الكمية مثل إلكترونات الأرجون الثمانية عشر . ثم تملأ الإلكترونات العشرة التالية القشرة الفرعية $l = 2$, $n = 3$. وهكذا يتبقى تسع إلكترونات لابد لـها أن تذهب إلى المستوى $n = 4$ ، بحيث يحتل اثنان منها القشرة الفرعية $n = 4$, $l = 0$ ، كما تحتل

* بالنسبة للذرات عديدة الإلكترونات ، فإن الإلكترونات التى لها نفس قيمة n (أى نفس القشـرة) ستوصف بأنها تقع فى نفس **القشرة الفرعية** إذا كان لها نفس قيمة l . وهكذا فإن الإلكترونات الستة فى الصفوف الثانى والثالث والرابع بالجدول 4-27 ستحتل نفس القشـرة الفرعيـة ، أمـا الإلكترونـان الموجودان فى الصف الأول من الجدول فيحتلان قشرة فرعية مختلفة .

الجدول 5-27 :

m_s	m_l	l	n	عدد حالات القشرة الفرعية
± 1/2	0	0	3	2
± 1/2	−1	1	3	6
± 1/2	0			
± 1/2	+1			
± 1/2	−2	2	3	10
± 1/2	−1			
± 1/2	0			
± 1/2	+1			
± 1/2	+2			

تحتل ستة إلكترونات أخرى القشرة الفرعية $n = 4$, $l = 1$. ويتبقى إلكترون واحد ، عليه أن يحتل واحدة من حالات $n = 4$, $l = 2$. وحيث أن هذا الإلكترون الأكثر بعدًا عن النواة (ويسمى إلكترون **التكافؤ**) ذو ارتباط ضعيف نسبيًا ، فإن الروبيديوم قادر على تكوين روابط كيميائية بسهولة مع العناصر الأخرى .

27-9 أشعة إكس (السينية) وأطياف الذرات عديدة الإلكترونات

يدلنا مبدأ باولى للاستبعاد ـ كما رأينا ـ على كيفية تعبئة الإلكترونات داخل ذرة ما في حالتها الأرضية . وتقدم لنا المعادلة 10-27 طاقة أى إلكترون ـ كتقريب أول ـ فى الحالة رقم n . وعلى ذلك تكون طاقة إلكترون فى ذرة عديدة الإلكترونات هى نفس طاقة إلكترون موجود فى نفس الحالة فى ذرة الهيدروجين مضروبة فى Z^2 . وينهار هذا التقريب بالنسبة للإلكترونات الخارجية للذرة ـ مع ذلك ـ لأن طاقات التفاعل بين هذه الإلكترونات تقترب من فروق الطاقة بين مستويات طاقة بوهر . وهكذا لا تستطيع طاقات بوهر أن تنطبق على هذه الإلكترونات الخارجية .

على أن ، طاقة التفاعل بين الإلكترونات تكون صغيرة بالنسبة لفروق الطاقة بين الحالتين $n = 1$ و $n = 2$. ففى حالة الزنك ، مثلاً ، $(Z = 30)$ ، تكون طاقات بوهر هى :

$$E_n = -\frac{13.6Z^2}{n^2}\ \text{eV} = -\frac{12,240}{n^2}\ \text{eV}$$

ويصبح الموقف أكثر إبهارًا بالنسبة للذهب $(Z = 79)$ حيث ،

$$E_n = -\frac{84,900}{n^2}\ \text{eV}$$

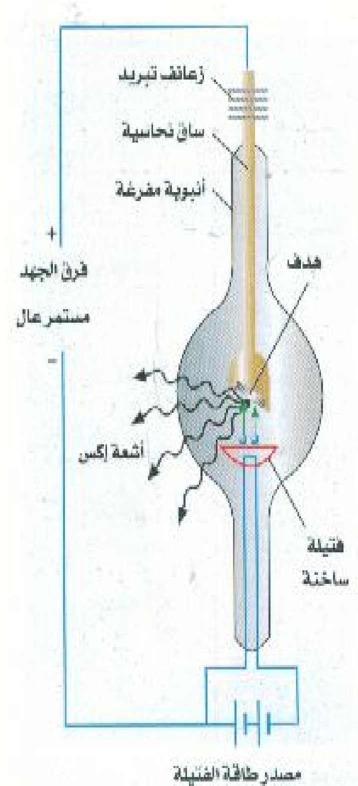
فكما نرى ، تصبح فروق الطاقة بين الحالتين E_1 و E_2 فى هذه الذرات مقدرة بعشرات

الآلاف من الإلكترون فولت ، وإذا قورنت طاقات التفاعل الكولومية بين الإلكترونات بطاقات ما بين القشرات هذه ، فإنها ستبدو صغيرة . ومن ثم تكون طاقات بوهر صحيحة تقريبًا بالنسبة للإلكترونات الموجودة فى القشرتين $n = 1$ و $n = 2$ للذرات ذات الأعداد الذرية الكبيرة .

فإذا انتقلنا إلى إلكترون موجود فى قشرة خارجية فإن الموقف سيبدو مختلفًا تمامًا . أولاً ، ستظهر إلكترونات القشرات الداخلية وهى تلغى جزءً من الشحنة النووية وذلك لكونها أقرب إلى النواة ، ولذلك فإن الكترونات القشرة $n = 2$ « ترى » الشحنة النووية وكأنها $(Z - 2)e$ تقريبًا بدلاً Ze ؛ وبالمثل فإن إلكترونات القشرة $n = 3$ ، ترى الشحنة النووية وكأنها $(Z - 10)e$ وذلك بسبب الإلكترونين الموجودين فى القشرة $n = 1$ والإلكترونات الثمانية الموجودة فى القشرة $n = 2$. ويقال عندئذ أن الإلكترونات الداخلية « تحجب » الشحنة النووية عن الإلكترونات الخارجية .

وعلاوة على هذا التأثير فإن إلكترونات القشرة الخارجية معرضة لطاقات من ناحية التفاعل التنافرى للإلكترونات مع بعضها البعض والذى يكتنف كل الإلكترونات الأخرى بالذرة . ولقد ذكرنا من قبل أن هذه الطاقات تقترب فى مقاديرها مع الفروق الصغيرة فى الطاقة بين القشرات الخارجية ؛ وأن معادلة بوهر للطاقة لا تنطبق عليهم .

إن الذرة لكى تشع ، فلابد لبعض إلكتروناتها من أن تستثار إلى طاقات أعلى ؛ وحيث أن إلكترونات المدارات الخارجية لا تحتاج سوى لقدر ضئيل من الطاقة حتى تستثار إلى حالات فارغة ، لذا لن يكون من الصعب الحصول على ضوء مرئى من ذرات ذات Z مرتفعة . وما يحدث ببساطة هو أن تبخر المادة وتستخدم داخل أنبوبة تفريغ تشبه إلى حد بعيد تلك التى رأيناها فى الشكل 27-8 . إلا أن خطوط الطيف التى تنبعث نتيجة انتقالات بين مستويات القشرة الخارجية تلك عديدة ومعقدة جدًا .



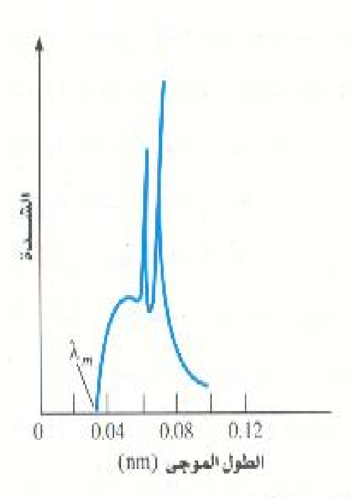
شكل 27-17:
تقذف الإلكترونات المنبعثة من الفتيل الساخن سطح الهدف الذى يقوم بإطلاق أشعة إكس .

يصبح الموقف مختلفًا تمامًا بالنسبة للانتقالات التى تتضمن إلكترونات القشرة الداخلية . ويمكننا الملاحظة من المثال التوضيحى 27-2 أن القشرات $n = 1$ ، $n = 2$ ، $n = 3$ تكون ممتلئة فى حالة ذرة الزنك غير المستثارة ، ومن ثم لا يمكن استثارة إلكترون داخلى $(n = 1)$ إلى أى من القشرتين $n = 2$ أو $n = 3$ الممتلئتين بسبب مبدأ الاستبعاد . ولكى تستثير إلكترونًا من $n = 1$ ، فإن الطاقة التى لابد من إمداد الذرة بها ، يجب أن تكون - على الأقل - كافية للسماح للإلكترون بالقفز إلى القشرة $n = 4$. وهذه الطاقة تصل إلى نحو 12,000 eV فى حالة الزنك . وبمجرد حدوث تلك القفزة ، فإن ثغرة تنشأ فى القشرة $n = 1$ ، وعندئذ يستطيع إلكترون من إحدى القشرتين $n = 2$ أو $n = 3$ ، أن يقفز بسهولة نحو تلك الثغرة ، مطلقًا فوتونًا ذا طاقة مساوية لفرق الطاقة بين الحالتين النهائية والابتدائية للإلكترون . إذا ما هبط إلكترون من $n = 2$ إلى $n = 1$ فإن طاقة الفوتون الذى سيطلقه ستصل إلى نحو 9000 eV . ولعلك تذكر من المثال التوضيحى 26-4 أن الفوتون الذى طاقته 1 eV يكون طوله الموجى 1240 nm ، لذا فالطاقة 9000 eV ستناظر طولاً موجيًا مقداره :

$$\lambda = \frac{1\ \text{eV}}{9000\ \text{eV}} \times 1240\ \text{nm} = 0.14\ \text{nm}$$

ويقع هذا الطول الموجى فى منطقة أشعة إكس . هكذا نكتشف أن الانتقالات بين القشرات الداخلية فى ذرة ذات Z مرتفعة ، تؤدى إلى ظهور أشعة إكس ولكى نولد أشعة إكس يلزمنا أن نستثير إلكترونات القشرة الداخلية نحو قشرات خارجية خالية ، ويستلزم هذا ـ كما رأينا ـ كميات ضخمة من الطاقة .

يوضح الشكل 17-27 دائرة أنبوبة أشعة إكس نموذجية ، حيث تنبعث الإلكترونات من فتيلة ساخنة ثم تعجل عبر فرق للجهد من الرتبة 10^5 V . وعندما ترتطم هذه الإلكترونات ذات الطاقة المرتفعة بالذرات ذات العدد الذرى Z الكبير فى الهدف فإنها تقتلع إلكترونات من القشرات الداخلية للذرات . وعندما تهبط إلكترونات أخرى نحو الثغرات المتكونة ، فإن فوتونات أشعة إكس تنبعث . ويكون لأشعة إكس المنبعثة بهذه الطريقة أطوال موجية تميز فرق الطاقة بين القشرات المختلفة فى الذرة ، بمعنى أن الفوتونات المنبعثة تحمل من الطاقة ما يساوى الفرق بين طاقتى قشرتين تمثلان نقطتى النهاية والبداية بالنسبة للإلكترون الذى يهبط إلى الثغرة . ويشار إلى أشعة إكس المنبعثة فى هذه العملية **بأشعة إكس المميزة** .



شكل 18-27:
طيف أشعة إكس المنبعثة من هدف من الموليبدنم المقذوف بإلكترونات طاقتها 35,000 eV .



وهناك نوع آخر من أشعة إكس المنبعثة من الهدف المقذوف بالإلكترونات ويشار إليه بمصطلح **أشعة الفرملة** . وكما يقتضى معنى المصطلح ، فإن هذه الأشعة تنبعث بواسطة الإلكترونات المقذوفة عندما يحدث لها إبطاء عند اصطدامها بالهدف وكلنا يعلم أن أى شحنة معجّلة تقوم بإشعاع موجات كهرومغناطيسية ، ولذلك يصدر إشعاع من هذه الإلكترونات المقذوفة عندما تتعرض لإبطاء قوى بواسطة الهدف . وحيث أن معدل الإبطاء كبير جدًا ، لذا يكون الإشعاع المنبعث ذا طول موجى قصير ، ويكون إشعاع الفرملة فى منطقة أشعة إكس . إلا أن لأشعة الفرملة ـ خلافًا لأشعة إكس المميزة ـ مدى متصل من الأطوال الموجية وهذا يعكس حقيقة أن الإبطاء يتم بعدد لا نهائى تقريبًا من الطرق المختلفة ولذلك تتباين الطاقة المنطلقة من تصدم لآخر .

يحتوى الشكل 18-27 على رسم بيانى للإشعاع المنبعث من هدف صنع من عنصر الموليبدنم ، قذف بإلكترونات طاقتها 35,000 eV . القمتان الحادثتان بالشكل هما أشعة إكس المميزة المنبعثة نتيجة هبوط الإلكترونات إلى القشرة $n = 1$ من القشرتين $n = 2$ و $n = 3$. وبطبيعة الحال ، ينتمى الطول الموجى الأقصر للانتقال ذى الطاقة الأكبر وهو الانتقال من $n = 3$ إلى $n = 1$. وأشعة الفرملة هى المسئولة عن الإشعاع منخفض الشد ، الذى ينتشر على مدى جميع الأطوال الموجية الأكبر من λ_m . وحيث أن طاقة الإلكترونات المقذوفة كانت 35,000 eV ، فإن الفوتونات المنبعثة لا يمكن أن تتخذ طاقات أكبر من هذه القيمة ، فإذا استخدمنا التحويل الذى يقتضى أن الطول الموجى 1240 nm يكافئ 1 eV (المثال التوضيحى 4-26) لوجدنا أن 35,000 eV تناظر 1240/35,000 = 0.035 nm .

وكما هو واضح من الشكل 18-27 فإن أكبر طاقة لأشعة الفرملة هى بالفعل ، ما يناظر هذا الطول الموجى .

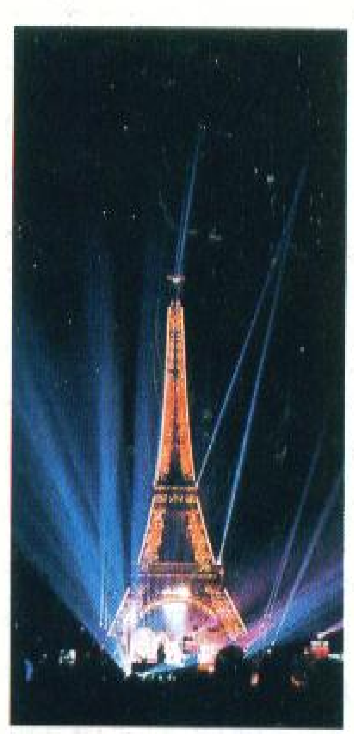
مثال توضيحي 3-27

أوجد فرق الطاقة بين المستويين $n = 1$ و $n = 2$ فى المولیبدنم ، مستعينًا بالبيانات الواردة في الشكل 18-27 .

استدلال منطقى : لقد علمنا عند مناقشة الشكل 18-27 أن القمة الحادثة عند 0.070 nm قد نتجت من الانتقال $n = 2$ إلى $n = 1$ ؛ ولذلك فالفوتون الذى طوله الموجى 0.070 nm يحمل الطاقة التى يفقدها الإلكترون عندما يهبط من القشرة $n = 2$ إلى القشرة $n = 1$. وحيث أن 1240 nm تناظر 1 eV ، فإن 0.070 nm تناظر طاقة مقدارها 1240/0.070 أو نحو 18,000 eV . وعلى ذلك فلابد أن يكون فرق الطاقة بين هاتين القشرتين لذرات الموليبدنم نحو 18,000 .

تمرين : قذف هدف من الزنك بإلكترونات طاقتها 13,000 eV . ما هو أقصر طول موجى لأشعة إكس المنبعثة من الهدف ؟ وما هو الطول الموجى - بالتقريب - المناظر للانتقال من $n = 3$ إلى $n = 1$ ؟ **الإجابة** : 0.095 nm ؛ 0.114 nm .

10-27 ضوء الليزر



تستطيع حزم أشعة الليزر الضيقة والقوية أن توفر مؤثرات بصرية رائعة .

تتكون حزمة الضوء العادى من مجموعة من الموجات المنفردة الصادرة عن ذرات منفردة بالمصدر الضوئى . وعلى الرغم من كون الموجات المكونة لحزمة ضوء وحيد اللون ذات طول موجى واحد ، إلا أن الموجات التى تبثها الذرات المنفردة ليست متفقة فى الطور ؛ فهى لا تحتفظ بعلاقات طور بين بعضها البعض . وبعبارة أخرى لا تكون هذه الموجات مترابطة . ويشير التحليل الإحصائى إلى أنه إذا كانت سعة كل موجة هى A ، فإن سعة الموجة الناتجة من جمع عدد N من مثل هذه الموجات هى $A\sqrt{N}$.

افترض - مع هذا - أننا استطعنا جعل الذرات تتزامن عند إطلاق موجات الضوء وحيد اللون فى مصدر ضوئى ما ، بحيث كان لتلك الموجات نفس الطور وأصبحت الموجات مترابطة . عندئذ تكون سعة الموجة المحصلة للعدد N من الموجات المترابطة والمتفقة فى الطور ولكل منها سعة A هى مجموع سعات الموجات أو AN . وإذا قارنّا هذه السعة مع سعة الموجات غير المترابطة $A\sqrt{N}$ لوجدنا أن النسبة بين السعتين هى $AN/A\sqrt{N}$. وحيث أن شدة الموجة تتناسب مع مربع سعتها ، فإننا نجد أن :

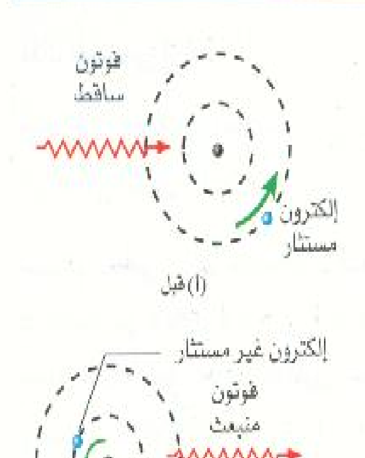
$$\frac{\text{شدة الموجات المترابطة}}{\text{شدة الموجات غير المترابطة}} = \left(\frac{AN}{A\sqrt{N}}\right)^2 = N$$

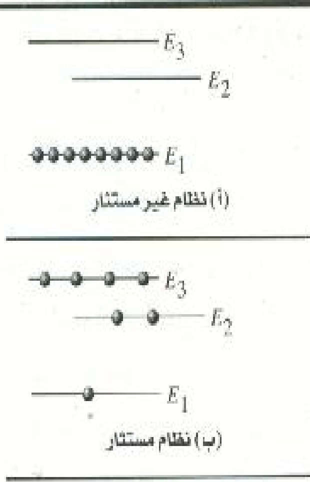
أى أن الحزمة المكونة من N موجة ستكون أشد N مرة عندما تكون الموجات مترابطة عما لو كانت الموجات غير مترابطة . ولأن حزمة نموذجية قد تتكون من مليون موجة منفردة عند نقطة ما ، فإن الحزمة المترابطة قد تكون أشد بنحو مليون مرة من حزمة مماثلة ولكنه غير مترابطة .

ولم يتم ابتكار مصدر ضوئي للموجات المترابطة إلا في الخمسينيات من القرن العشرين . وكان هذا المصدر هو ما سمي الليزر (وهو مكون من الحروف التي تبدأ بها كلمات ـ تكبير الضوء بواسطة الانبعاث المستحث للإشعاع ـ باللغة الإنجليزية) .

Light Amplification by stimulated Emission of Radiation

وتستخدم في هذا المصدر الحقيقة التي أشار إليها أينشتين عام 1917 : من الممكن للذرات الموجودة في حالة مستثارة أن تستحث لكي تقفز إلى مستوى طاقة أدنى عندما يرتطم بها فوتون في ضوء ساقط عليها إذا كانت طاقته تماثل الفرق بين مستويي الطاقة الواردين في عملية القفز . أي أن الإلكترون يطلق فوتونًا له طول موجي يماثل الطول الموجي للفوتون الساقط . وينطلق كل من الفوتونين ، الساقط والمنبعث بعيدًا عن الذرة وهما متفقين في الطور .





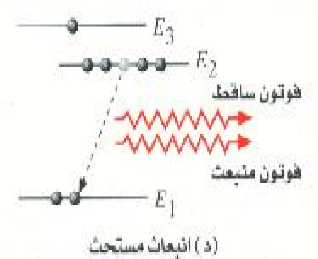
شكل 19-27:
ينتج الانبعاث المستحث موجات مترابطة

وهذه العملية التي يطلق عليها **الانبعاث المستحث** ، موضحة في الشكل 19-27 . وسنرى الآن كيف أمكن الاستفادة من هذه الظاهرة في الليزر .

إن الإلكترونات لابد أن تكون في حالة مستثارة حتى يمكنها إطلاق طاقة عندما تستحث بواسطة فوتونات ساقطة . ولذلك لزم أن تكون هناك وسيلة للاستثارة كما أنه للحصول على شدة كبيرة للانبعاث المستحث ، لابد من وجود عدد من الإلكترونات في الحالة المستثارة أكبر من العدد الموجود في الحالة الأرضية . وهذا الموقف هو ما يطلق عليه **انقلاب توزيع الإلكترونات** . ولكي يتحقق هذا الانقلاب فإن الإلكترون الموجود في حالة مستثارة عليه أن يظل بها لبعض الوقت قبل أن يعود تلقائيًا إلى الحالة الأرضية والحالة المستثارة هذه يقال أنها حالة **استقرار مؤقت** أو حالة **شبه مستقرة** : وهي الحالة التي يكون فيها الإلكترون مستقرًا بشكل غير عادي ، ومنها يهبط الإلكترون إلى حالة أدنى بعد فترة طويلة نسبيًا .



نستطيع الآن ، في ضوء الاعتبارات السابقة ، أن نلخص العمل الأساسي لليزر بالرسم البياني لمستويات الطاقة كالمبين في الشكل 20-27 . وتستثار الإلكترونات بوسيلة ما من الحالة الأرضية E_1 إلى حالة مستثارة E_3 (الشكل 20-27 (أ) ، (ب)) ثم تقفز معظم الإلكترونات إلى الحالة شبه المستقرة E_2 حيث تظل هناك لفترة ما ولا تعود تلقائيًا إلى E_1 مباشرة مما ينشأ عنه تراكم الإلكترونات في E_2 أي انقلاب في توزيع الإلكترونات بالنسبة للحالة الأرضية . فإذا مر فوتون طاقته $E_2 - E_1$ خلال الذرة ، فإنه يكون قادرًا على حث إلكترون لكي يقفز من E_2 إلى E_1 (الشكل 20-27 (جـ)) . وينشأ عن هذه القفزة فوتون مطابق للفوتون الساقط ومتفق معه في الطور (الشكل 20-27 (د)) وبتكرار هذه العملية ذاتيًا العديد من المرات فإن عدد الفوتونات يتنامى بمتوالية هندسية ويحدث تكبير لشدة الضوء .



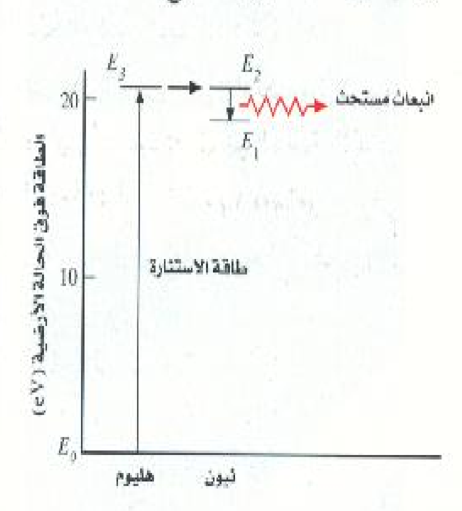
شكل 20-27:
لابد من توافر انقلاب في التوزيع وحالات استقرار مؤقت ، وانبعاث مستحث في أي جهاز ليزر .

من أجهزة الليزر الشائعة ليزر هليوم ـ نيون ، الذي يتكون من أنبوبة تفريغ كهربي مستقيمة جدًا ، وتحتوي على 15% من حجمها من غاز الهليوم و 85% من غاز النيون . ويضم النظام الذري لذرات الهليوم والنيون ثلاثة مستويات للطاقة ذات أهمية خاصة : هي

E_1 ، E_2 و E_3 يوضحها الشكل 21-27 و E_3 هى حالة الاستقرار المؤقت **للهليوم** وتقع عند 20.61 eV فوق E_0 ، أما E_2 فهى حالة الاستقرار المؤقت للنيون وتقع عند 20.61 eV فوق E_0 . والحالة E_1 تمثل مستوى طاقة فى **النيون** عند 1.96 eV أسفل E_2 .

تكون معظم إلكترونات النظام تقريبًا فى الحالة الأرضية قبل تنشيط التفريغ الكهربى ثم يستثار بعضها ليقفز إلى المستويين E_2 و E_3 بواسطة تفريغ ذى جهد مرتفع وتقوم التصادمات بين ذرات الهليوم والنيون بنقل طاقة إلكترونات الهليوم المستثارة إلى E_2 مما يخلق انقلابًا فى توزيع الإلكترونات بين E_2 و E_1 .

سنفترض الآن أن عددًا قليلاً من ذرات النيون المستثارة قد قام بالانتقال تلقائيًا من E_2 إلى E_1 ، مطلقًا بهذا فوتونات طولها الموجى 632.8 nm ، وتناظر قفزة فى الطاقة مقدارها 1.96 eV . ويمكن لهذه الفوتونات أن تمتص بواسطة الإلكترونات القليلة فى المستوى E_1 فتستثار إلى E_2 . كما أنها تستطيع - كما فى الشكل 21-27 . أن تجعل الإلكترونات تهبط من E_2 إلى E_1 مفضية بهذا إلى حدوث انبعاث مستحث لموجات مطابقة للموجات الساقطة . ونظرًا لوجود انقلاب التوزيع فإن الانبعاث المستحث يكتسح أى امتصاص تال للفوتونات وتأخذ شدة الموجات المنبعثة فى الازدياد كلما مرت خلال الغاز . وتكون النتيجة النهائية هى حزمة مترابطة تمر خلال أنبوبة التفريغ .



شكل 21-27:
الرسم البيانى لمستويات الطاقة فى ليزر الهليوم — نيون . تستثار الإلكترونات إلى المستويين E_2 و E_3 بواسطة تفريغ كهربى . ثم تقوم التصادمات بين ذرات الهليوم والنيون بجعل إلكترونات الهليوم تستثير المزيد من إلكترونات Ne إلى المستوى E_2 خالقة بهذا انقلابًا فى التوزيع فى هذه الحالة شبه المستقرة . ثم تستحث إلكترونات المستوى E_2 لكى تقفز إلى المستوى E_1 الذى يقع عند 1.96 eV أسفل E_2 .

مرآة
أنبوبة زجاجية
ذرة مستثارة
مرآة ذات تسريب

شكل 22-27:
رسم تخطيطى يبين كيفية تراكم الانبعاث المستحث ، لكى يكوّن موجة مترابطة قوية فى أنبوبة الليزر .

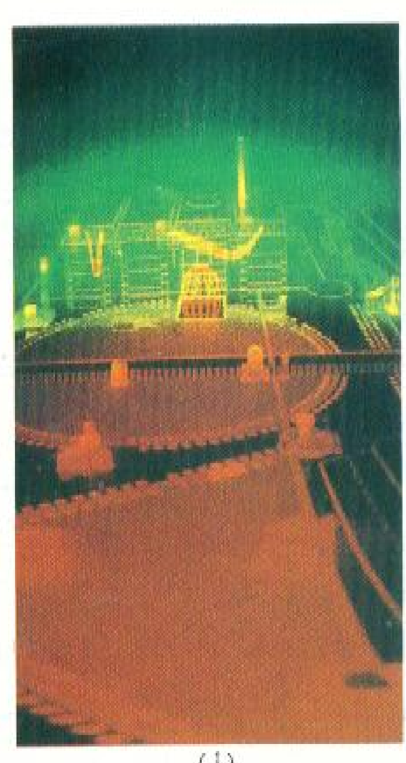
ويتكون طرفا أنبوبة التفريغ من مرآتين مستويتين ومتوازيتين إلى أقصى حد (الشكل 22-27) . إلا أن المرآة اليمنى تفضض بشكل طفيف فقط لدرجة أنها لا تعكس إلا نحو 99% من الضوء فقط . إن العديد من ذرات النيون المستثارة تقوم بإطلاق فوتونات متماثلة ومتفقة فى الطور كما يدل على ذلك الشكل 22-27 . وما هى إلا فترة صغيرة حتى

تمتلئ الأنبوبة بالموجات المترابطة التي تتحرك يمنة ويسرة بين المرآتين الموجودتين عند طرفي الأنبوبة ، وبذلك تنشأ حزمة قوية جدًا ووحيدة اللون ومترابطة في نفس الوقت داخل الأنبوبة . ويخرج كسر صغير من الحزمة المترابطة من الأنبوبة عبر المرآة « ذات التسريب » عند أحد طرفي الأنبوبة .

وحزمة الضوء الصادرة من جهاز الليزر قوية للغاية ، وذلك لأن جميع الموجات التي تخرج من طرف أنبوبة الليزر تكون مترابطة . ويكون الطول الموجي للحزمة محددًا بشكل قاطع وهو 632.8 nm لأن جميع الموجات متطابقة . وليست الحزمة قوية ومترابطة فحسب ولكنها دقيقة جدًا ومستقيمة لا تتفرق إلا بقدر ضئيل . ويرجع ذلك إلى أن أية أشعة داخل الأنبوبة ؛ تتعرض لتفرق شديد بعيدًا عن المحور ، ستفقد في الجوانب خلال رحلاتها العديدة جيئة وذهابًا . وهناك أهمية عملية عظيمة ، نابعة من حقيقة أن الحزمة ليست متفرقة بشكل ملموس ؛ وخلافًا لما يحدث في حالة بصيلة مصباح عادى ، فإن طاقة حزمة الليزر لا تأخذ شكل المروحة وهى تنتشر في الفضاء ؛ وإنما تنطلق فى الفضاء عبر أسطوانة دقيقة وتحتفظ بشدتها لمسافات طويلة جدًا .



(ب)



(أ)

(أ) هولوجرام لقصر الاكتشافات فى لافيليت بباريس ، (ب) (إلى اليمين) يمكن استخدام الضوء المترابط لليزر لمعرفة الأشكال كما يحدث فى أجهزة مسح شفرة القضبان (باركورد) الشائعة الاستعمال فى كثير من نقط التحقق فى المحلات التجارية .

على الرغم من أنك قد تكون معتادًا على استخدام ليزر الهليوم ـ نيون ، الذى يبلغ خرجه نحو ميللى وات فحسب ، إلا أن هناك عددًا كبيرًا من أنواع الليزر المتاحة حاليًا ، وجميعها تحتاج إلى تواجد حالة مؤقتة الاستقرار حتى يتكون انقلاب التوزيع ، ويؤدى الانبعاث المستحث ، من ثَمَّ إلى ظهور مجموعة مترابطة من الموجات المتفقة فى الطور . وتتفاوت هذه الأنواع من حيث الطول الموجي الذى يتراوح بين الأشعة تحت الحمراء البعيدة وأشعة إكس الطويلة . كما تتراوح قدراتها من كسر صغير من الميللى وات (فى حالة الليزر المستخدم فى الأجهزة الصوتية لأسطوانات مدمجة مثلاً) إلى ملايين الواتات

(فى حالة الليزر المستخدم فى بحوث الاندماج النووى الذى سنناقشه فى الفصل القادم) .

لقد أصبح الليزر ـ بعد أربعين سنة منذ افتتاحه ـ واحدًا من أكثر المنتجات التطبيقية للبحوث الفيزيائية انتشارًا . ويتيح ترابط ضوئه تسجيل معلومات ذات طور وشدة فوتوغرافيا من خلال عملية صارت تعرف باسم **هولوجرافيا** (أو التصوير الهولوجرافى) . وتبرز الصور الهولوجرافية الأبعاد الثلاثة للجسم الذى التقطت له الصورة . كما يسمح ترابط الأشعة بتركيزها فى بؤرة ذات مساحة صغيرة للغاية ، مما يوفر حزمة ضوئية دقيقة للغاية وذات شدة بالغة فى نفس الوقت . وهذا ما أتاح للجراحين أن يدمروا الأنسجة المصابة فى نقط محددة بعناية أو أن يقوموا « بلحام » الأنسجة المزقة ، كما فى حالة الانفصال الشبكى . كما أن حزمة الليزر قادرة على اختراق المواد بشكل أسرع وأدق من آلات الثقب المألوفة . واستقامة حزمة الليزر ، تجعلها ذات فائدة فى عمل المسح والتحكم فى عمليات الآلات المختلفة والعمليات الصناعية التى يستخدم فيها « الإنسان » الآلى .

وترتبط أجهزة الليزر حاليًا مع أجهزة الكومبيوتر بطرق عديدة ، كما فى حالة قراءة شفرة القضبان (باركورد) المثبتة على معظم البضائع التى نشتريها . وتستخدم أجهزة ليزر الحالة الصلبة فى أنظمة الأقراص المدمجة المسموعة والمرئية ، حيث ينعكس شعاع الليزر من على الأشكال المرقمة المحفورة على القرص ، ثم تحول إلى إشارات إلكترونية يقوم الكومبيوتر بتحليلها وتحويلها إلى أشكال من إشارات الجهود الكهربية التى تدير مكبرات الصوت وخرج أجهزة تسجيل الفيديو .

وستظهر تطبيقات جديدة لليزر بشكل متنامى فى المستقبل ، مثل نقل الإشارات عن طريق تضمين (تعديل) الضوء المرئى وتخزين الذاكرة البصرية فى أجهزة الكومبيوتر .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) الذرة النووية ، (ب) الطيف الخطى والمستمر ، (جـ) حد السلسلة ، (د) ثابت ريدبرج ، (هـ) سلاسل ليمان ، بالمر ، وباشن ، (و) مدارات بوهر ونصف قطر بوهر ، (ز) الرسم البيانى لمستويات الطاقة ، (ح) الحالة الأرضية ، (ط) طاقة التأين ، (ى) الأعداد الكمية : الرئيسى والمدارى والمغناطيسى واللف ، (ك) قشرة الطاقة والقشرة الفرعية ، (ل) مبدأ باولى للاستبعاد ، (م) أشعة إكس المميزة وأشعة الفرملة ، (ن) الموجات المترابطة ، (س) الانبعاث المستحث ، (ع) الحالة شبه المستقرة (مؤقتة الاستقرار) ، (ف) انقلاب التوزيع ، (ص) الليزر .

2 أن تشرح كيف قدمت تجربة رذرفورد دليلاً على مفهوم الذرة النووية .

3 أن تذكر قطر الذرة بالتقريب .

4 أن ترسم خطوط سلسلة بالمر وتكتب معادلة بالمر . أن تحسب الطول الموجى لخط معين فى سلسلة بالمر إذا علم ثابت ريدبرج . أن تكرر الحسابات بالنسبة لسلسلة ليمان وسلسلة باشن .

5 أن تشرح كيف تؤدى الخواص الموجية للإلكترون إلى وجود مدارات بوهر ومستويات طاقة بوهر .

6 أن تذكر الصيغة العامة لمستويات طاقة ذرة الهيدروجين بالإلكترون فولت . وأن تنفذ الرسم البيانى لمستويات طاقة الهيدروجين .

7 أن تحسب الطول الموجى الذى تطلقه ذرة الهيدروجين فى أى انتقال محدد . وأن تبين على الرسم البيانى لمستويات الطاقة كيفية ظهور سلاسل ليمان ، وبالمر ، وباشن .

8 أن تشرح السبب فى أن ذرات الـهيدروجين تمتص فى العادة الأطوال الموجية لسلسلة ليمان وليس الأطوال الموجية لسلسلة بالمر .

9 أن تشرح معنى الرسم البيانى للتوزيع الإلكترونى مثل الذى تبينه الأشكال 27-15 ، 27-16 .

10 أن تستخدم مبدأ باولى للاستبعاد فى تحديد التوزيع الإلكترونى للحالة الأرضية بالنسبة لعناصر بسيطة . وأن تشرح كيف يتنبأ مبدأ الاستبعاد بالنشاط الكيميائى (التكافؤ) لـهذه العناصر .

11 أن تصف كيف يتم توليد أشعة إكس فى أنبوبة أشعة إكس . وأن تحسب أقصر طول موجى لأشعة إكس يتم إشعاعه من هدف يقذف بإلكترونات ذات طاقة معينة .

12 أن تشرح مبدأ الليزر الغازى بدلالة الحالات شبه المستقرة ، وانقلاب التوزيع ، والانبعاث المستحث . وأن تذكر الملامح المهمة لحزمة ليزر من حيث الترابط والطور والشكل . أن تشير إلى أثر هذه الملامح فى تحديد الاستخدامات العريضة لأجهزة الليزر .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية

ثابت ريدبرج (R)

$$R = \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 k_e^2 m}{h^3 c}$$

وبالنسبة للـهيدروجين ، $Z = 1$ و $R = 1.0974 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$

نصف قطر بوهر (r_1)

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 Z e^2 m k_e}$$

وبالنسبة للـهيدروجين ، $Z = 1$ و $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}\ \text{m}$

تعريفات ومبادئ أساسية :

السلاسل الطيفية لذرة الـهيدروجين

تبعث ذرة الـهيدروجين وتمتص الإشعاع الكهرومغناطيسى على هيئة سلاسل من الأطوال الموجية تتحدد بالمعادلة العامة التالية :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{j^2}\right)$$

والرمزان i و j يعبران عن أعداد صحيحة . ولكل سلسلة من الأطوال الموجية قيم محددة للعدد i . وللحصول على الأطوال الموجية المنفردة فى سلسلة ما نضع قيمًا للعدد j بحيث تكون أرقامًا صحيحة أكبر من i .

خلاصة

1 سلاسل الأطوال الموجية الثلاث الأولى هى

سلسلة ليمان (فوق البنفسجية) $i = 1$

سلسلة بالمر (المرئية) $i = 2$

سلسلة باشن (تحت الحمراء) $i = 3$

2 لكل سلسلة قيمة صغرى للأطوال الموجية تسمى حد السلسلة وتناظر العدد $j = \infty$. وهذا الحد يعطى من

$$\frac{1}{\lambda_\infty} = \frac{R}{i^2}$$

المدارات المستقرة ومستويات طاقة ذرة هيدروجين بوهر

تتحدد أنصاف أقطار المدارات المستقرة بالمعادلة :

$$r_n = n^2 r_1$$

حيث n أى عدد صحيح و r_1 هو نصف القطر الأول لبوهر

وتتخذ الإلكترونات فى ذرة بوهر الطاقات الكلية التى تحددها المعادلة :

$$E_n = \frac{-Ze^2k_e}{2r_n} = -\frac{E_1}{n^2}$$

حيث $E_1 = \frac{-Ze^2k_e}{2r_1}$ هى أدنى طاقة وتعرف بالحالة الأرضية .

خلاصة

1 E_n هى مجموع طاقتى الحركة والوضع الكهربية ، حيث تكون فى كل مستوى طاقة $KE = \frac{+Ze^2k_e}{2r_n}$ و $PE = \frac{-Ze^2k_e}{r_n}$.

2 عندما تكون E_n سالبة فإن الإلكترون يكون فى حالة مقيدة . وحتى يتحرر الإلكترون (بتأيين الذرة) فإن حدًا أدنى من الطاقة الموجبة مساوٍ للطاقة E_n لابد من تقديمه للإلكترون .

3 بالنسبة للهيدروجين ، $E_1 = -13.6\ \text{eV}$.

الأعداد الكمية ومبدأ باولى للاستبعاد

الأعداد الكمية الأربعة هى التى تحدد حالة إلكترون ما فى ذرة ما :

الرئيسى : $n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$

المدارى : $l = 0, 1, 2, \ldots, n-1$

المغناطيسى : $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots\ldots \pm l$

اللف : $m_s = \pm \frac{1}{2}$

ينص مبدأ الاستبعاد على أنه لا يمكن لاثنين من الإلكترونات فى ذرة واحدة أن يتخذا نفس الأعداد الكمية الأربعة ، أى أنهما لا يستطيعان احتلال نفس الحالة فى ذرة ما .

خلاصة

1 يحدد العدد الكمى الرئيسى طاقة الحالة . وحيث أن هناك عدة قيم ممكنة للأعداد l ، m_l ، m_s لكل n فإن عددًا من الإلكترونات قد تتخذ نفس مقدار الطاقة دون احتلال نفس الحالة الكمية .

2 يفسر مبدأ الاستبعاد ترتيب وتكافؤ إلكترونات الحالة الأرضية بالجدول الدورى للعناصر .

أسئلة وتخمينات

1 لماذا لا يقوم غاز الهيدروجين الذى يحضره التلاميذ فى المعمل بالتوهج وإطلاق الضوء ؟

2 هب أن لديك أنبوبة زجاجية بها قطبان وطرفاها مسدودان بإحكام . وأن الغاز المحبوس بداخلها هو إما هيدروجين أو هليوم . كيف تعرف نوع الغاز دون أن تكسر الأنبوبة ؟ ولو كان الغاز تحت ضغط مرتفع فما هى الصعوبات التى قد تواجهك ؟

3 عندما يخترق ضوء أبيض وعاءً يحتوى على غاز الهيدروجين فإن من المشاهد أن أطوال الموجات المناظرة لسلسلة بالمر وكذلك المناظرة لسلسلة ليمان يتم امتصاصها . ونستنتج من هذا أن الغاز ساخن جدًا . لماذا خطر لنا هذا الاستنتاج ؟ (الواقع أن

هذا هو أساس إحدى طرق قياس درجة حرارة غاز ساخن) .

4 اشرح بوضوح السبب فى أن خطوط انبعاث أشعة إكس فى المدى 0.1 nm لا تشاهد فى حالة أنبوبة أشعة إكس يستخدم فيها هدف مصنوع من فلز ذى عدد ذرى منخفض .

5 ترتاب إحدى شركات الصلب فى أن أحد منافسيها يضيف إلى منتجاته كسرًا من نسبة مئوية من عنصر أرضى نادر . كيف يمكن معرفة هذا العنصر بسرعة وتحديد تركيزه فى المنتج ؟

6 يقع إلكترونا ذرة الهليوم فى نفس قشرة الطاقة ولكنهما يتجنبان بعضهما البعض إلى درجة يصبح معها تفاعلهما ذا أهمية ثانوية . ضع تقديرًا لطاقة تأين الهليوم (بالإلكترون فولت) ، أى للطاقة اللازمة لاقتلاع أحد الإلكترونين وتحريره . ثم ضع تقديرًا للطاقة اللازمة لاقتلاع وتحرير الإلكترون الثانى . أى هاتين القيمتين أكثر وثوقًا ويمكن الاعتماد عليها ؟

7 تبلغ طاقات التأين لليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم 5.4 ، 5.1 ، 4.3 eV على الترتيب ، كما تكون تلك الطاقات فى حالة الهليوم ، والنيون ، والأرجون 24.6 ، 21.6 ، 15.8 eV على الترتيب . اشرح بطريقة وصفية وفى إطار التركيب الذرى السبب فى أن هذه القيم هى المتوقعة .

8 احسب مقدار الطاقة التى على أحد الفوتونات أن يتخذها حتى يكون قادرًا على انتزاع إلكترون من أعمق قشرة فى ذرة الذهب .

مسائل

القسم 27-1

1 يبلغ نصف قطر نواة الذهب نحو 6×10^{-15} m ونصف قطر ذرته نحو 0.150 nm . تخيل أنك ترغب فى رسم ذرة الذهب بمقياس رسم مناسب مستخدمًا نقطة قطرها 0.10 mm لتمثل النواة . ما هى المسافة التى يجب أن ترسم عندها الحافة الخارجية للذرة ، بعيدًا عن مركز النقطة ؟

2 سددت حزمة منتظمة مكونة من 10,000 مقذوف ضئيل نحو نافذة مساحتها $0.5\ m^2$ وكان جزء من زجاجها مكسورًا ، وكانت مساحة الحزمة هى نفس مساحة النافذة . (أ) إذا لم ينفذ عبر النافذة سوى 800 مقذوف ، فما هى مساحة الفجوة فى زجاج النافذة ؟ (ب) ثم أزيل الزجاج كله تمامًا وعلقت 400 كرة صغيرة من خيوط فى فتحة النافذة ، فمر 9200 مقذوفًا من أصل 10,000 عبر النافذة فى خطوط مستقيمة . كم تبلغ مساحة المقطع المستعرض لكل كرة تقريبًا ؟ (جـ) ما هو الشىء الذى يناظر الكرات الواردة فى الجزء (ب) من تجربة رذرفورد ؟

■ 3 لقد صوب رذرفورد ومساعدوه جسيمات ألفا (شحنتها $q = 2e$) نحو ذرات الذهب $(Z = 79)$. وكانت طاقة حركة بعض الجسيمات 4.8 MeV . (أ) ما هى طاقة وضع أحد جسيمات ألفا (بدلالة r) عند نقطة تبعد مسافة r من نواة الذهب ؟ ما هى أقصر مسافة يمكن لجسيمات رذرفورد أن تقترب بها من مركز نواة الذهب ؟ افترض أن نواة الذهب تظل ساكنة ، واهمل تأثير الإلكترونات الذرية البعيدة .

4 تبلغ كثافة الذهب $19.3\ g/cm^3$ وكتلته الذرية 197 kg/mol . (أ) ما هى كتلة ذرة الذهب ؟ (ب) كم عدد ذرات الذهب فى مساحة مقدارها $1\ cm^2$ من غشاء ذهبى سمكه 0.040 mm ؟ (جـ) قطر نواة الذهب نحو 10^{-14} m ؛ فإذا افترضنا عدم وجود تراكب بين النوى فما هو الجزء من مساحة مقدارها $1\ cm^2$ سوف تغطيه أنوية الذهب ؟ (د) وإذا كان رذرفورد قد استخدم غشاءً بهذا السمك ، فما هو كسر جسيمات ألفا التى ستنحرف بشدة ؟

5 تخيل أن جسيمات ألفا التى سرعتها 2.0×10^7 m/s قد أطلقت على ذرات الرصاص $(Z = 82)$. إلى أى مدى يمكن لجسيمات ألفا أن تقترب من مركز نواة الرصاص ؟

6 ما هى مسافة أدنى اقتراب لجسيمات ألفا التى سرعتها 1.8×10^7 m/s من نواة النحاس $(Z = 29)$ ؟

القسمان 2-27 و 3-27

7 احسب نصف قطر مدار بوهر الأول والثانى والثالث لذرة الهيدروجين .

▪ 8 إثبت باستخدام النموذج شبه الكلاسيكى لذرة الهيدروجين أن سرعة الإلكترون v_n الموجود فى مدار بوهر رقم n ، تعطى بالعلاقة $v_n = 2\pi ke^2/nh$.

▪ 9 احسب سرعة الإلكترون المتوقعة كلاسيكيا فى مدارى بوهر الأول والثانى . ثم قارن هاتين القيمتين بسرعة الضوء c .

▪ 10 احسب كمية التحرك الزاوية لإلكترون فى المدار الأول لبوهر .

▪ 11 ما هى طاقة حركة إلكترون فى المدارين الأول والثانى لبوهر فى ذرة هيدروجين ؟

▪ 12 احسب طاقة وضع إلكترون فى ذرة هيدروجين عندما تكون فى حالتها الأرضية .

13 يدور إلكترون فى ذرة الهليوم وحيدة التأين حول النواة ذات الشحنة $+2e$. احسب نصف قطر مدار بوهر الأول $(n = 1)$ والثانى $(n = 2)$ لهذا الأيون .

14 احسب أدنى ثلاث مستويات طاقة لذرة الهليوم وحيدة التأين ، والتى وردت فى المسألة رقم 13 .

15 تخيل أن النظرية شبه الكلاسيكية للذرة قابلة للتطبيق على أعمق إلكترون فى ذرة الذهب $(Z = 79)$ ، إذا تم إهمال وجود جميع الإلكترونات الأخرى . (وهذا التقريب ليس سيئًا جدًا فى واقع الأمر) . (أ) إثبت أن الطاقة اللازمة لإزالة هذا الإلكترون من الذرة هى 13.6×79^2 eV . (ب) ما هو نصف قطر مدار بوهر الأول بالنسبة لهذه الذرة ؟

▪ 16 تخيل أن إلكترونًا يدور حول نواة الهيدروجين داخل مدار دائرى نصف قطره 0.50×10^{-10} m . (أ) ما هى السرعة التى يتحرك بها الإلكترون إذا اعتبرنا أن قوة كولوم تمثل قوة الجذب المركزى ؟ (ب) ما هو تردد الإلكترون فى هذا المدار ؟ (جـ) ما هو الطول الموجى للإشعاع الذى يبثه هذا الإلكترون ، على أساس النظرية الكلاسيكية .

▪ 17 هب أن لديك ذرة ليثيوم ثنائية التأين $(Z = 3)$. (أ) احسب أدنى ثلاثة مستويات طاقة لهذا الأيون . (ب) ما مقدار الطاقة اللازمة لإزالة آخر إلكترون من ذرة الليثيوم ثنائية التأين ؟

▪ 18 تخيل أن ذرة النيتروجين $(Z = 7)$ قد انتزع منها ستة إلكترونات . احسب نصف قطر المدار الأول لبوهر وطاقة الحالة الأرضية ، والطاقة اللازمة لإزالة آخر إلكترون من هذه الذرة .

▪ 19 أعد المسألة رقم 18 بالنسبة للصوديوم $(Z = 11)$ الذى انتزع من ذرته عشرة إلكترونات .

القسمان 4-27 و 5-27

20 احسب الطول الموجى للخطوط الأربعة الأولى فى سلسلة بالمر .

21 قارن بين الطولين الموجيين للخطين الثالث عشر والرابع عشر فى سلسلة بالمر . ماذا تستنتج من هذه الأرقام ؟

22 قارن بين الطولين الموجيين للخط السادس فى سلسلة بالمر والخط الأول فى سلسلة ليمان .

23 احسب الأطوال الموجية للفوتونين اللذين لهما أقصر طول موجى وأطول طول موجى فى سلسلة باشن .

24 قارن بين الطول الموجى للفوتون الذى له أطول طول موجى فى سلسلة بالمر والطول الموجى للفوتون الذى له أقصر طول موجى فى سلسلة باشن .

25 احسب طاقة الفوتون الذى إذا امتصته ذرة هيدروجين ، تسبب فى انتقال إلكترونى من الحالة الابتدائية $n = 2$ إلى الحالة النهائية $n = 5$.

▪ 26 قذفت إلكترونات طاقتها 10.9 eV نحو غاز من ذرات الهيدروجين . ما هو الطول الموجى للإشعاع الذى ينبعث بقوة من الغاز ؟

- 27 قذفت إلكترونات طاقتها 12.9 eV نحو غاز من ذرات الهيدروجين . ما هو الطول الموجي للإشعاع الذى ينبعث بقوة من الغاز ؟
- 28 إذا مر طيف مستمر خلال غاز هيدروجين غير ساخن ؟ فما هى الفوتونات التى لـها أول أدنى خمس طاقات ، تمتص بواسطة الغاز ؟
- 29 ما هى طاقات الفوتونات التى لـها أدنى ثلاث طاقات والتى امتصتها ذرات الهليوم أحادية التأين غير المستثارة ؟ وما هى أطوالـها الموجية ؟
- 30 تمر حزمة من ضوء فوق بنفسجي طوله الموجي 72 nm خلال غاز من ذرات الهيدروجين غير المستثارة . فإذا اصطدم أحد الفوتونات بذرة ما وأطلق منها إلكترونًا ، فما هى طاقة حركة هذا الإلكترون بمجرد تحرره من الذرة ؟ (هذا هو ما يسمى **الأثر الكهروضوئي الذرى**) .
- 31 تسقط حزمة من أشعة إكس التى طولها الموجي 5.0 nm على غاز من ذرات الهيدروجين غير المستثارة فتقوم بانتزاع الإلكترونات الذرية الضوئية من ذرات الهيدروجين . (أ) ما هى طاقة الإلكترونات المنتزعة ؟ (ب) وما هى سرعتها ؟
- 32 طاقة تأين ذرات الهليوم غير المستثارة هى 24.6 eV . تخيل أن إشعاعًا فوق بنفسجي طوله الموجي 40 nm يسقط على تلك الذرات . (أ) ما هى طاقة أسرع إلكترون ينطلق من الذرات بواسطة الإشعاع فوق البنفسجى ؟ (ب) وما هى سرعة هذا الإلكترون ؟
- 33 قذف غاز من ذرات الهيدروجين عند درجة حرارة الغرفة بواسطة حزمة من الإلكترونات التى عجلت عبر فرق للجهد مقداره 13.3 V . ما هو الطول الموجي للضوء الذى يشعه الغاز نتيجة لهذا القذف ؟

الأقسام من 6-27 إلى 8-27

34 ما هو طول دى برولى الموجي لإلكترون فى مدار بوهر الرابع ؟

35 احسب عدد الإلكترونات التى يمكن أن تتواجد في القشرات (أ) $n = 3$ و (ب) $n = 5$ فى ذرة من نوع ذرات بوهر .

36 احسب طول دى برولى الموجي للإلكترونات الموجودة فى مدارات بوهر فى المسألة رقم 35 .

37 ما عدد القشرات الفرعية المدارية الممكنة بالنسبة للمستوى الذرى الذى يميزه العدد الكمي الرئيسى $n = 3$ ؟

- 38 تعرَّف القشرة الفرعية الذرية على أنها مجموعة إلكترونات فى ذرة ما ، يكون لـها نفس العدد الكمي الرئيسى n والعدد الكمي المدارى l ، ولكن لـها أعداد كمية مغناطيسية m_l وأعداد لف كمية m_s مختلفة . استخدم هذه الحقائق فى إيجاد عدد الإلكترونات التى توجد فى القشرة الفرعية $n = 3$ ، $l = 2$ فى الذهب .
- 39 ما عدد الحالات المغناطيسية الفرعية الممكنة فى قشرة فرعية لـها الأعداد الكمية $n = 3$ ، $l = 1$ ؟ وما عدد الإلكترونات اللازمة لملء هذه القشرة الفرعية ؟
- 40 لديك حالة من نوعية حالات بوهر ، عددها الكمي الرئيسى $n = 4$. ما عدد القيم الممكنة عند (أ) العدد الكمي المدارى l و (ب) العدد الكمي المغناطيسي m_l ؟
- 41 ما عدد المجموعات المختلفة من الأعداد الكمية (l ، m_l ، m_s) بالنسبة لإلكترون عدده الكمي الرئيسى هو (أ) $n = 3$ ، (ب) $n = 4$ ، (جـ) $n = 5$ ؟
- 42 هب أن لديك إلكترونين موجودين فى نفس النظام ويتخذ كل منهما الأعداد الكمية $n = 3$ و $l = 0$. (أ) تخيل أن للإلكترونين لف ولكن مبدأ الاستبعاد غير مطبق . كم عدد الحالات سيكون ممكنًا بالنسبة للإلكترونين ؟ ، (ب) ما عدد الحالات المسموح بها إذا كان مبدأ الاستبعاد مطبقًا ؟
- 43 اعتبر نظامًا ليس للإلكترونات فيه لف ولـهذا لا يوجد عدد كمي للف . كم عدد الإلكترونات يمكن أن يوجد فى الحالة

التي عددها الكمي الرئيسي $n = 3$ ؟

■ 44 إذا اعتبرنا الظروف الواردة في المسألة رقم 43 ، فما هي أول أربعة عناصر في الجدول الدوري يكون تكافؤها 1 + ؟

■ 45 كون جدولاً تبين فيه الأعداد الكمية للإلكترونات المختلفة في ذرة الصوديوم (Z = 11) .

■ 46 اكتب قيم مجموعة الأعداد n ، l ، m_l ، m_s بالنسبة لإلكترونات ذرة الأكسجين (Z = 8) .

■ 47 اكتب مجموعات الأعداد الكمية لإلكترونات ذرات (أ) النيون (Z = 10) و (ب) البوتاسيوم (Z = 19) .

القسم 9-27

48 تستخدم في أجهزة التليفزيون الملون الحديثة عادة حزم إلكترونية معجلة عبر فرق للجهد يزيد على 20,000 V . ما هو أقصر طول موجي لأشعة إكس التي تولدها حزمة معجلة في 24,000 V عندما تصطدم بنهاية أنبوبة التليفزيون ؟ (لم تكن أجهزة التليفزيون قديمًا مدرعة بشكل صحيح ولذا كانت كميات كبيرة من أشعة إكس تتسرب خارج الجهاز) .

49 تستخدم أشعة إكس التي توصف بأنها « حادة » وذلك للوصول إلى الأورام السرطانية الموجودة داخل عمق جسد المريض . ويتم توليد هذه الأشعة باستخدام جهود مرتفعة جدًا . ما هو أقصر طول موجي لأشعة إكس التي تنتج من أنبوبة أشعة إكس تعمل عند 148 kV ؟

50 ما هو الحد الأدنى للجهد الممكن استخدامه في أنبوبة أشعة إكس ، تنتج أشعة إكس طولها الموجي 0.045 nm ؟

■ 51 يستخدم التنجستين كهدف في أنبوبة أشعة إكس (Z = 74) (أ) ما هو الحد الأدنى لفرق الجهد المطلوب إذا كان الإلكترون $n = 1$ هو الذي سيستثار ؟ (ب) ما هو أطول طول موجي لأشعة إكس المنبعثة عندما يحدث للذرة انتقال من $n = 2$ إلى $n = 1$ ؟

■ 52 يطلق على أكبر الخطوط شدة في طيف أشعة إكس للمواد المستخدمة كأهداف في أنابيب أشعة إكس ـ الخط K_α . وينشأ هذا الخط حسب نظرية بوهر عندما تنتقل الذرة من الحالة $n = 2$ إلى الحالة $n = 1$. ما هو الطول الموجي للخط K_α بالنسبة لهدف مصنوع من عنصر الكروم (Z = 24) ؟

■ 53 ما هي الأطوال الموجية لخطوط أشعة إكس K_α الناتجة من (أ) الرصاص (Z = 82) و (ب) الزركون (Z = 40) ؟

■ 54 ما هو الحد الأدنى لفرق الجهد اللازم في أنبوبة أشعة إكس لكي يستثير إلكترونًا في $n = 1$ إذا كان الهدف مصنوعًا من (أ) النيكل (Z = 28) و (ب) الألمونيوم (Z = 13) ؟

■ 55 ما هو فرق الطاقة بين المستويين $n = 2$ و $n = 3$ لعنصر الموليبدنم (Z = 42) ؟ وما هو الطول الموجي لأشعة إكس المنبعثة عندما تنتقل ذرات الموليبدنم من المستوى $n = 3$ إلى المستوى $n = 2$ ؟

القسم 10-27

■ 56 تستخدم نبضة ضوء من ليزر الأرجون ($\lambda = 456.5$ nm) في « لحام » شبكية منفصلة في عين شخص مصاب . فإذا دامت النبضة 1×10^{-8} s وتحمل من الطاقة 1.6×10^{-3} J . فكم تكون القدرة اللحظية الواصلة إلى نقطة اللحام ؟

■■ 57 تتفرق حزمة ليزر بشكل طفيف بسبب تأثيرات الحيود عند طرف أنبوبة الليزر . افترض أن حزمة ليزر هليوم ـ نيون ($\lambda = 633$ nm) ذات قطر مقداره 2.8 nm عند مغادرتها لأنبوبة الليزر . كم سيبلغ قطر الحزمة عندما تصطدم بهدف يبعد عن الأنبوبة 160 m ؟ اعتبر أن انتشار الحزمة مرده الوحيد إلى الحيود .

■■ 58 إذا أطلق جهازا ليزر موجات لها نفس الطول الموجي ، فإن حزمتين منطلقتين من الجهازين ومن نفس النوع ستكونان مترابطتين . وحتى لو اختلف الطول الموجي بشكل طفيف فإن الحزمتين سوف تحدثان أثارًا تداخلية . وعند ربط الحزمتين فإنهما تعطيان حزمة محصلة تتراوح مع الزمن بين السطوع والإظلام وهذا شبيه بظاهرة النبضات في الموجات الصوتية التي

عالجناها فى فصل سابق فإذا كان الطول الموجى لإحدى الحزمتين 632 nm تماما ، فكم يجب أن يكون الطول الموجى للحزمة الأخرى حتى يحدث أقصى سطوع مرة كل ثانية ؟ **تلميح** : استخدم حقيقة أنه عندما تكون $x \ll 1$ فإن $\frac{1}{1 \pm x} \cong 1 \mp x$

مسائل عامة

59 افترض أن كمية التحرك الزاوية لدوران الأرض حول الشمس تحقق شرط الرنين بالنسبة لموجات دى بـرولى $n\lambda_n = 2\pi r_n$. كم ستكون قيمة العدد الكمى n فى هذه الحالة ؟ (يعتبر هذا مثالاً على مبدأ بوهـر للتناظر الـذى ينـص علـى حقيقـة أن النظم الماكروسكوبية (الكبيرة) كالأرض ، تناظر عادة أعدادًا كمية كبيرة جدًا ولذلك فهى تتصرف بشكل كلاسيكى) .

60 إن ذرة هيدروجين ذات مدار قطره عدة أمتار ستتصرف ـ كلاسيكيًا ـ كهوائى الراديو وتبث إشعاعًا تـردده يسـاوى تـردد إلكترون فى المدار . ولابد أن تتنبأ النظرية الموجية بهذه النتيجة ، وذلك لأنها تنطبق على هوائيات اللاسلكى مثلما تنطبق على الذرات . اثبت أن التردد المدارى للإلكترون يعطى بالعلاقة : $f_{\text{orb}} = \frac{me^4}{4\epsilon_0^2 h^3 n^3}$

احسب التردد المنبعث من ذرة الـهيدروجين عندما تهبط من الحالة n إلى الحالة $n-1$. اثبت أنه عندما يكـون n كبـيرًا جدًا ($n \gg 1$) فإن هذا التردد يكون هو نفسه التردد المدارى f_{orb} .

61 اعتبر الانتقالات الإلكترونية الأربعة الممكنة التالية لذرة الـهيدروجين : (1) من $n = 2$ إلى $n = 5$ ، (2) من $n = 3$ إلى $n = 6$ ، (3) من $n = 7$ إلى $n = 4$ ، (4) من $n = 4$ إلى $n = 1$. (أ) أى الانتقالات ينبعث منـه فوتـون ذو أطـول طـول موجـى ؟ (ب) عند أى انتقال تمتص الذرة أقصى طاقة ؟

62 تخيل أن نواة ذرية تتكون من بروتونات ونيوترونات لا تفاعل بينها ؛ وأنها تتحرك فى مسارات دائرية داخل النـواة . وحيث أن نصف قطر النواة النموذجية الكبيرة نحو 5×10^{-15} m ، فلنـا أن نعتبر أن الجسيمات فـى الحالـة الأرضيـة سيكون نصف قطر مدارها 5×10^{-15} m . كم يجب أن يكون طول دى برولى الموجى بالنسبة لبروتون فى حالـة رنـين فـى مثل هذا المدار وفى حالته الأرضية ؟ وما هى طاقة جزئ البروتون (بالإلكترون فولت eV) ؟ إهمل تأثيرات النسبية .

63 لجزئ البنزين محيط على هيئة شكل مسدس طـول كـل مـن أضلاعـه 0.140 nm . وحيـث أن للجـزىء ثـلاث روابـط مزدوجة ، فلا يكون من غير العقول أن نعتبر أن إلكترونًا واحدًا يستطيع فـى الجـزىء أن يـدور بحريـة فـى دائـرة حـول محيط الجزىء كما لو كان إلكترونًا حرًا يتحرك فى مسار مسدس الشكل . وباستخدام الاستدلال المنطقى المبنى على الرنين والطول الموجى لدى برولى ، اثبت أن مستويات الطاقة لـهذا الإلكترون لابد وأن تعطى (فى ظل هذا التقريب) بالمعادلة :

$$E_n = (7.1 \times 10^{17}) \frac{n^2 h^2}{m}$$

مع اعتبار أن كل الكميات معبر عنها بوحدات SI . ولو أن نتيجة هذه الحسابات صحيحة ، فعند أى طول موجـى علينـا أن نتوقع امتصاص حلقة البنزين للضوء ؟ . وهل يتناقض هذا مع حقيقة أن البنزين سائل رائق كالبللور ؟

64 (أ) احسب سرعة ارتداد ذرة هيدروجين نتيجة إطلاقها لفوتون طوله الموجى 486 nm ، وهو الخط الثانى فى سلسلة بالمر . (ب) أوجد نسبة طاقة الارتداد هذه إلى الفرق فى الطاقة بين حالتين تتسببان فى ظهور خط الانبعاث .



يوجد فى مركز الذرة تمامًا ـ كما أوضح رذرفورد عام 1911 ـ نواة موجبة الشحنة . وعلى الرغم من أنها لا تشكل إلا نحو 10^{-13} بالمائة من حجم الذرة إلا أن بها 99.9 بالمائة من كتلة الذرة . وسنقوم في هذا الفصل بفحص الملامح البارزة للنواة ومم تتكون وما هي العوامل التي تؤثر على استقرارها . كما سنعالج عددًا قليلاً من التطبيقات العديدة للفيزياء النووية فى عالمنا المعاصر .

28-1 العدد الذرى وعدد الكتلة

امتدت بحوث رذرفورد التى تناولناها فى الفصل السابع والعشرين ، فى نواحى كثيرة مع مرور الزمن . وأصبحنا نعرف ـ حاليًا ـ أن النواة تتركب من بروتونات (p) ونيوترونات (n) ، وقد أطلق على هذه الجسيمات **نويّات** نظرًا لأنها تسكن داخل النواة . ولعلك تذكر أن شحنة البروتون e+ وأن النيوترون لا شحنة له ، كما أن كتلتى هذين الجسيمين هما :

$$m_p = 1.673 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 1.007277\ \text{u}$$

و

$$m_n = 1.675 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 1.008775\ \text{u}$$

حيث تسمى وحدة الكتلة u **وحدة الكتل الذرية** (وتكتب أحيانا amu) . وسنقوم

بوضع تعريف لهذه الوحدة بشكل دقيق فى القسم 2–28 . أما الآن فسنؤكد فقط أن :

$$1\ \text{u} = 1.660566 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

يلاحظ أن كتلتي النيوترون والبروتون متساويتان تقريبًا وليس تمامًا . ولكل من البروتون والنيوترون عدد لف مقداره $\frac{1}{2}$ ، مثل الإلكترون ، ويخضعان لمبدأ باولى للاستبعاد . ومن قبيل المقارنة ، نجد أن كتلة الإلكترون :

$$m_e = 9.1094 \times 10^{-31}\ \text{kg} = 5.486 \times 10^{-4}\ \text{u}$$

وكما ذكرنا فى الفصل السابع والعشرين ، فإن العدد الذرى Z يحدد عدد البروتونات فى نواة ذرة ما . وتحتوى الذرات المتعادلة (أى غير المؤينة) على Z إلكترون فى الحيز الواقع خارج النواة . ويتحدد السلوك الكيميائى لذرة ما بواسطة هذه الإلكترونات ، ولذلك تنتمى الذرات التى لها نفس العدد الذرى ، إلى نفس **العنصر** فكل ذرة كربون - مثلاً ، تحتوى على ستة إلكترونات ، ولكل ذرة ذهب 79 إلكترونًا . ويحتوى الملحق رقم 1 على الأعداد الذرية للعناصر .

وكتلة النواة أكبر من كتلة البروتونات التى عددها Z بسبب وجود النيوترونات داخل النواة (يستثنى من هذا الهيدروجين) . ويرمز لعدد النيوترونات فى النواة بالرمز N .

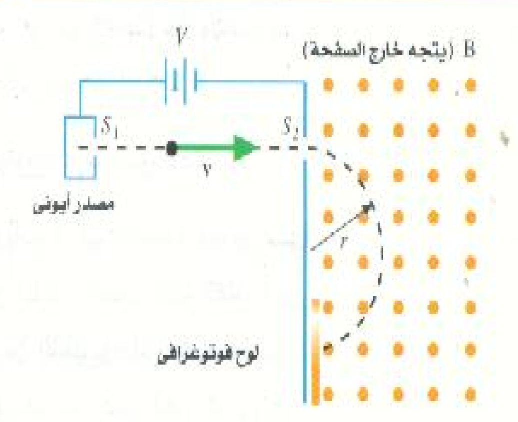
وحيث أن كتلة كل نوية قريبة من 1 u ، فلنا أن نتوقع أن تكون الكتلة النووية عددًا صحيحًا تقريبًا ، إذا عبرنا عنها بوحدات الكتل الذرية ، وهذا - فى الواقع - هو ما يحدث ، فكتلة نواة الهليوم ، مثلاً ، والتى تحتوى على بروتونين ونيوترونين ، هى $4.0026\ \text{u} \approx 4\ \text{u}$ ، بينما تصل كتلة نواة الأرجون $(Z = 18, N = 22)$ إلى $39.96\ \text{u} \approx 40\ \text{u}$ إذا استقر هذا فى الأذهان ، فيمكننا أن نميز كل نواة **بعدد الكتلة** A ، وهو يساوى عدد النويات داخل النواة : $A = Z + N$. وعدد الكتلة قريب جدًا من كتلة النواة مقاسة بوحدات الكتل الذرية .

2–28 الكتل النووية ؛ النظائر

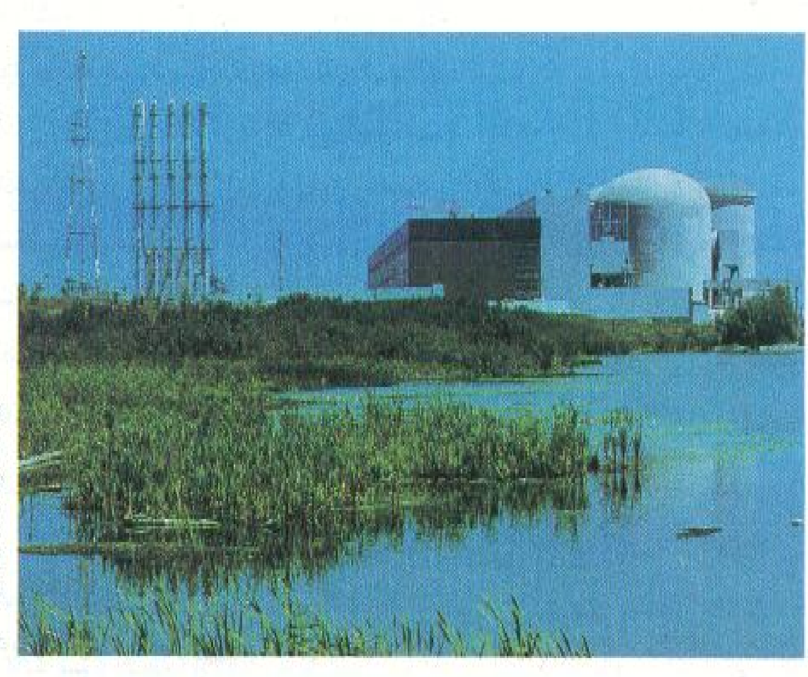
لقد تم قياس كتل النوى بدقة مرتفعة باستخدام أجهزة مطياف الكتلة الذى درسناه فى القسم 8–19 ، ويوضح الشكل 1–28 رسمًا بيانيًا تخطيطيًا لأحد أنواع ذلك الجهاز . وفيه يسمح لأيونات العنصر - المطلوب دراسته - بالهروب من المصدر الأيونى كما هو مبين بالشكل ، ثم تعجل حزمة الأيونات عبر فرق للجهد مقداره V ، ويتم تجميعها بواسطة فتحات مثل S_2 . تتحرك الأيونات بسرعة مقدارها v عندما تغادر S_2 ثم يتم حرفها لتأخذ مسارًا دائريًا بواسطة المجال المغناطيسى كما هو مبين . ويمكن قياس نصف قطر المسار r وذلك بتحديد المواقع التى تصطدم فيها الأيونات بلوح فوتوغرافى أو كاشف من أى نوع آخر .

يرتبط نصف قطر الانحناء r بكتلة الأيون بالعلاقة الآتية : (راجع المعادلة 5–19) .

$$m = \frac{r^2B^2q}{2V} \qquad (19\text{–}5)$$



شكل 1-28:
يتم حرف الأيونات بواسطة مجال مغناطيسى فى مطياف الكتلة .



يتم فى هذا المصنع فى كندا تصنيع الماء الثقيل ، $(^2H)_2O$ (حيث الأبراج العالية) . ويستخدم الماء الثقيل فى بعض أنواع المفاعلات النووية . أما الماء الذى يرى فى مقدمة الصورة فهو ماء طبيعى ، تحتوى جزيئاته على نحو 1/100 بالمائة من النظير ^2H (الديوتيريوم) .

فإذا علمت قيم r ، B ، q و V لأمكن حساب كتلة الأيون ، ولكى نحصل على كتلة النواة فإننا نطرح كتلة الإلكترونات المصاحبة للأيون من m .

عندما استخدم مطياف الكتلة لقياس الكتلة النووية ، برزت ظاهرة مثيرة للاهتمام فكثيرًا ما شوهد أن للعنصر الواحد حزمتين أو أكثر من الأيونات فى مطياف الكتلة بمعنى أن الجسيمات التى تصل إلى الكاشف تتخذ نصفى قطر محددين تمامًا أو أكثر ؛ فإذا ضممنا هذا الاكتشاف مع المعادلة (5-19) لأمكننا استنتاج أن : **نوى العنصر الواحد قد يكون ذا كتل مختلفة** .

وسنعتبر المثال التالى على سبيل التوضيح ، فعند تحليل الكلور النقى كيميائيًا فى مطياف الكتلة ، اتضح أنه يتكون من نوعين من النوى :

النوع الأول : الكتلة = 34.97 u النسبة المئوية = 75.4

النوع الثانى: الكتلة = 36.97 u النسبة المئوية = 24.6

ويقال أن **الوفرة الطبيعية** للنوع الأول هى 76.4 بالمائة ، وأن الوفرة الطبيعية للنوع الثانى 24.6 بالمائة . ويسلك كلا النوعين نفس السلوك الكيميائى تمامًا ؛ ومعنى ذلك أن التركيب الإلكترونى لكل منهما مطابق للآخر ، ومن ثم فلابد أن شحنتيهما النوويتين

متساويتان ، وكل منهما تساوى العدد الذرى Z مضروبًا فى كم الشحنة e . ويسمى مثل هذا النوى ، الذى له نفس الشحنة وله كتل مختلفة **نظائر العنصر المذكور** .

للنوى المتناظر نفس عدد البروتونات ولكن عدد النيوترونات هو الذى يختلف .

ولكى نقسم النوى حسب الكتلة والشحنة وعدد النويات ، فإن العادة جرت على تمييز العنصر الذى رمزه X بالشكل $^{A}_{Z}X$. فعلى سبيل المثال ، تمثل نظائر الكلور الذى تناولناه منذ قليل بالرمز $^{35}_{17}\mathrm{Cl}$ و $^{37}_{17}\mathrm{Cl}$: حيث لكل من النظيرين نفس العدد الذرى ، $Z = 17$ ، ولكن أحدهما عدده الكتلى $A = 35$ أما الآخر فعدده الكتلى $A = 37$ ، ويشار إلى هذين النظيرين على أنهما الكلور 35 والكلور 37 . ولنتناول مثالاً آخر وهو $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ويطلق عليه يورانيوم 238 . الذى تحتوى نواته على شحنة مقدارها $92e+$ وبها 92 بروتونًا و 146= 92 - 238 نيوترونًا . أما اليورانيوم 235 ، $^{235}_{92}\mathrm{U}$ فبه نفس عدد البروتونات 92 و 143 نيوترونا فقط داخل النواة .

ولعلك معتاد على الجدول الدورى للعناصر الذى درسته فى الكيمياء ، حيث تجد **الكتل الذرية** مدونة عادة إلى جانب العناصر ، وتعرّف على أنها متوسط كتل **النظائر** الموجودة فى الطبيعة . فمتوسط كتلتى نظيرى الكلور ، مثلاً ، هو

$$m_{av} = 35(0.754) + 37(0.246) = 35.5\ \mathrm{u}$$

وهى القيمة الواردة داخل الجدول الدورى الذى تجده فى الغلاف الداخلى الأخير للكتاب . كما يضم الملحق رقم 1 الكتل* الذرية لعدد كبير من النظائر . وعليك تذكر أن هذه هى كتل النوى ، **مضافا إليها كتل الإلكترونات الذرية** ، ومعبرًا عنها بوحدة الكتل الذرية المعرّفة بدلالة كتلة ذرة الكربون $^{12}_{6}\mathrm{C}$:

وحدة الكتل الذرية الواحدة (u) هى بالضبط جزء من اثنى عشر جزءًا من كتلة ذرة كربون 12 واحدة ($^{12}_{6}\mathrm{C}$) .

وتنسب كل الكتل الأخرى إلى هذا المقياس العيارى . والقيمة الواردة فى القسم 1–28 مأخوذة من بيانات مطياف الكتلة .

مثال توضيحى 1–28

ما هو الكسر الذى تمثله الإلكترونات فى الكتلة الذرية للنظير $^{235}\mathrm{U}$؟

استدلال منطقى : نعلم من الملحق رقم 1 أن الكتلة الذرية للنظير $^{235}\mathrm{U}$ هى $235.04\ \mathrm{u}$ ؛ وحيث أن العدد الذرى لليورانيوم 92 ، فإن لهذه الذرة 92 إلكترونًا ، فإذا كانت كتلة الإلكترون $9.11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$ أو $0.000549\ \mathrm{u}$ فإن :

$$\frac{92(0.000549)\ \mathrm{u}}{235\ \mathrm{u}} = 2.15 \times 10^{-4}$$

* لعلك تذكر من الفصل الحادى عشر أن مصطلحى **الوزن الذرى و الكتلة الذرية** يستعملان بنفس المعنى .

وهكذا ـ وفى كثير من الأغراض ـ يمكننا إهمال كتلة الإلكترونات. ■

28-3 الحجم والكثافة النوويان

يمكننا تقدير حجم النواة بكثير من الطرق . وإحدى هذه الطرق هى أن نقذف النواة بجسيمات مختلفة الأنواع مثلما فعل رذرفورد وننظر كيف تتشتت . وفى هذا الصدد لابد من استعمال جسيمات ذات طاقات عالية جدًا حتى تتغلب على تنافر كولوم مع النواة لو كانت الجسيمات هى بروتونات أو جسيمات ألفا وتثبت مثل هذه التجارب أن النواة لا يمكن اعتبارها كرة بسيطة مصمتة ذات تركيب منتظم .

وعلى الرغم من حقيقة أنه ليس للنواة نصف قطر محدد بشكل حاسم فيما يتعلق بشحنتها أو كتلتها ، إلا أن حوافها محددة بما يكفى لإعطائها نصف قطر تقريبى ذا معنى . وكما قد تتوقع فإن قذف النواة بجسيمات مشحونة يؤدى إلى قياس أولى لتوزيع الشحنة بالنواة ، فى حين أن قذفها بالنيوترونات يقيس توزيع الكتلة بشكل أولى . . كما تستخدم طرق أخرى لقياس نصف قطر النواة وهى تتفق فيما بينها تقريبًا ، على أن نصف قطر النواة R بالنسبة للعناصر المختلفة يعطى بالعلاقة :

$$R \approx (1.2 \times 10^{-15}\ \text{m})(A^{1/3}) \qquad (28\text{–}1)$$

حيث A هو عدد الكتلة للذرة المعنية .

ويلاحظ من المعادلة (1-28) أن نصف قطر النواة النموذجية هو من الرتبة 10^{-15} m . ولذلك فقد اصطلح على قياس الأطوال النووية بوحدة الفمتومتر (fm) ، حيث $1\ \text{fm} = 10^{-15}\ \text{m}$. وقد كانت هذه الوحدة فى الأصل فرمى ***fermi*** تخليدًا لاسم عالم الفيزياء النووية الشهر أنريكوفيرمى ، ثم أصبح من المعتاد استخدام التسميتين : فيرمى أو فمتومتر لتعنيا نفس الشىء .

إن تغير نصف القطر النووى مع $A^{1/3}$. يهيئ الحصول على معلومات مهمة حول كيفية تعبئة عدد A من النويات معًا داخل النواة . إذ لو حسبنا حجم النواة لوجدنا :

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(1.2\ \text{fm})^3(A) = (7.2 \times 10^{-45}\ \text{m}^3)(A)$$

والآن لنتدبر معنى هذه الكمية . . إذ لو أن المقدار $7.2 \times 10^{-45}\ \text{m}^3$. قد اعتبر كحجم نوية واحدة ، لكان الحجم V هو ببساطة مجموع الحجوم المنفردة لعدد A نوية . ونتيجة لذلك ، فإن جميع النوى الكبير ستكون كثافته واحدة تقريبًا كما سنرى فى المثال التوضيحى التالى :

مثال توضيحى 2-28

احسب كثافة نواة الذهب ρ .

استدلال منطقى : لو أهملنا كتلة الإلكترونات الذرية لوجدنا أن كتلة نواة الذهب

تساوى كتلته الذرية كما تندرج فى الملحق رقم 1 وهى 197 u . وحجم النواة هو

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = (7.2 \times 10^{-45}\ \mathrm{m^3})(A)$$

وحيث أن $A = 197$ وكتلة ذرة الذهب = 197 u ، فإن

$$\rho = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}} = \frac{(197\ \mathrm{u})(1.66\times10^{-27}\ \mathrm{kg/u})}{(7.2\times10^{-45}\ \mathrm{m^3})(197)} \approx 2.3\times10^{17}\ \mathrm{kg/m^3}$$

يلاحظ أنه لكون عدد الكتلة ($A = 197$) مساويًا تقريبًا للكتلة الذرية (197 u) فإن العدد (197) يتلاشى من البسط والمقام وتصبح قيمة ρ هى الكثافة التقريبية لجميع النوى . ولا يمكن أبدًا التعامل مع مثل هذه الكثافة الهائلة على نطاق واسع على ظهر الأرض ، وإنما فى باطن بعض النجوم (النجوم النيوترونية) قد توجد مثل هذه الكثافات الضخمة . ففى تلك النجوم ، تنسحق القشرات الإلكترونية بواسطة قوى التثاقل الهائلة عند مركز النجم . ■

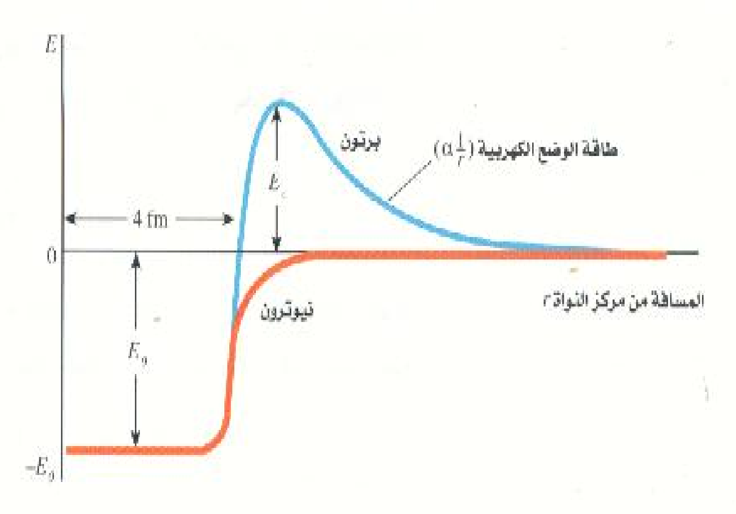
28-4 طاقة الربط النووية

نعلم جميعًا أن الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض ، وعلى ذلك فقد كان من الضرورى أن تميل القوى الكهروستاتيكية بين البروتونات داخل النواة إلى جعلها تنفجر . وقوى التجاذب التثاقلية بين النويات أصغر بعدد كبير من الرتب فى المقدار من أن تعادل قوى التنافر هذه . ولذلك لزم أن تكون هناك قوة ثالثة بين النويات لكى تجعلها تتجاذب معًا حتى تتماسك النواة . وهذه هى **قوة الربط النووية** التى كثيرًا ما تسمى ببساطة **القوة النووية** أو **القوة الشديدة** .

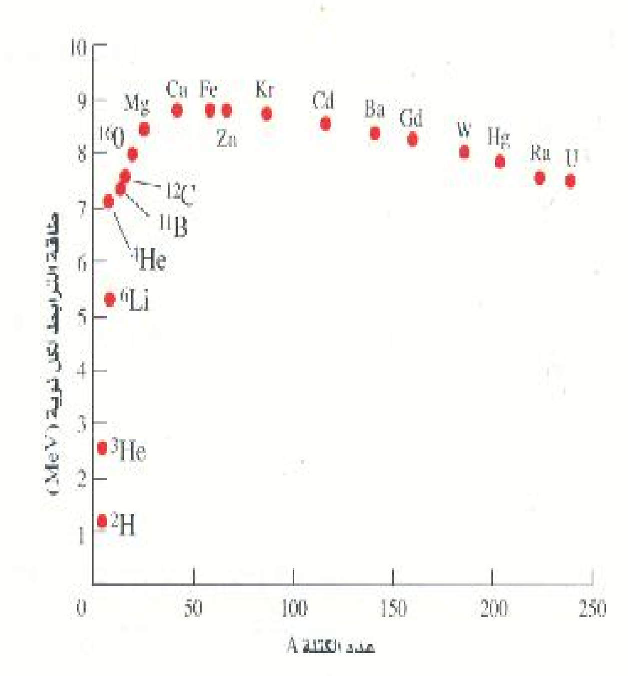
تختلف القوة النووية عن كل من القوى الكهروستاتيكية وقوى التثاقل فى أنها لا تتبع قانون التربيع العكسى ، وبدلاً من ذلك فإن مداها محدود ، وقد بينت التجارب أن هذه القوة تتضاءل لتصل إلى الصفر عندما تصل المسافة إلى ما يزيد عن 5×10^{-15} m وبعبارة أخرى عند مسافات تصل إلى نحو ضعف قطر النوية . أما إذا قلت المسافة عن هذا ولو بمقدار طفيف ، فإن القوة النووية تتعاظم لتطغى على قوى التنافر بين أى بروتونين وتقوم بربطهما معًا . وإذا أخذنا تقريبًا أوليًا ، فإن القوة النووية بين البروتونين هى نفسها التى تكون بين نيوترونين أو بين بروتون ونيوترون . إلا أن هذه القوى النووية لا تأثير لها على الإطلاق ، على الإلكترونات . وهذه نقطة مهمة علينا تذكرها عند معالجة التغيرات التى تطرأ على النوية وتؤدى إلى ظهور إلكترونات داخل النواة .

دعنا الآن ننظر فى ما يحدث لطاقة مجموعة من النويات المتباعدة عن بعضها البعض عندما تجتمع معًا فى تركيب نووى . يمكننا اعتبار طاقة تفاعل هذه النويات صفرًا عندما تكون متباعدة عن بعضها البعض ، وحينئذ تكون الطاقة الكلية للمجموعة هى مجموع طاقات كتل السكون لها . فإذا ما اقتربت النويات من بعضها البعض ، فإن

البروتونات ستعانى من تزايد التنافر بسبب قوى كولوم ، أما النيوترونات فلن يعنيها هذا فى شيء ، ولن تعانى من أية قوة ، فإذا صارت المسافة نحو 2 fm ، فإن كلاً من البروتونات والنيوترونات ستبدأ فى الإحساس بقوة الربط النووية الشديدة التى تطغى على تنافر كولوم ، ونتيجة لذلك تتقارب البروتونات والنيوترونات حتى تكون نواة . وبالنسبة لنواة ما فإن كل بروتون وكل نيوترون يكون مربوطاً داخل النواة بنفس طاقة الربط وهى $-E_0$. (ما سبب كون طاقة الربط ذات إشارة سالبة ؟) . ويلخص الشكل 28-2 شكل طاقات البروتون والنيوترون عند مسافات مختلفة من النواة (طاقات كتلة السكون المتفردة ليست مذكورة) ونستنتج من هذا أن :



شكل 28-2:
منحنيات طاقة وضع نيوترون وبرتون داخل نواة مستقرة . والقيم النموذجية يمكن أن تكون $E_0 = 50$ MeV ، $E_c = 8$ MeV .



شكل 28-3:
طاقة الربط لكل نوية فى حالة بعض نماذج العناصر .

طاقة النواة المستقرة أقل من مجموع طاقات كتل السكون للنويات المنفردة التى تكوّن النواة .

تختلف قيمة E_0 من تركيب نووى لآخر كما هو مبين فى الشكل 28-3 . وخلافاً لطاقة ربط الإلكترونات الذرية التى لا تعدو بضع وحدات من الإلكترون فولت فإن النويات ترتبط داخل النواة بطاقات أكبر من ذلك بملايين المرات كما يظهر فى الشكل . كما

يلاحظ أن E_0 تصل إلى قيمتها العظمى للعناصر المحيطة بالحديد ($Z = 26$) وتكون أصغر من ذلك بالنسبة للنوى الذى قيم عدده الذرى أكبر من ذلك أو أصغر . أى أن الشكل 3-28 قد يفسر على أنه يقدم مؤشرًا على الاستقرار النووى .

وحيث أنه طبقًا لنظرية النسبية ، ترتبط التغيرات فى الطاقة بتغيرات فى الكتلة ، فإن علينا أن نتوقع أن النواة المكتملة ستكون ذات كتلة أصغر من كتلة مجموع كتل السكون للنويات المنفردة بداخلها . ويعرف الفرق فى الكتلة هذا **بالنقص الكتلى** للنواة ويمكن كتابته على الصورة :

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{nuc}}$$

حيث m_p و m_n هما كتلتا بروتون ونيوترون حرين ، أما M_{nuc} فهى الكتلة الحقيقية للنواة المكتملة . وتنص نظرية النسبية على أن النقص الكتلى مرتبط بطاقة الربط الكلية للنواة :

$$\text{طاقة الربط الكلية} = \Delta mc^2$$

وتعتبر الحقيقة الكامنة فى أن الكتل المقاسة وطاقات الربط بالنوى تتفق مع هذا النص دليلاً مباشرًا على صحة نظرية النسبية . وسوف نعود لمعالجة هذا الأمر فيما بعد عند تناول طرق توليد الطاقة من النوى .

مثال توضيحى 3-28

ما مقدار الطاقة اللازمة لتغيير كتلة نظام ما بما قيمته 1 u ؟

استدلال منطقى : سنطبق معادلة الكتلة ـ الطاقة لأينشتين $\Delta E = \Delta mc^2$. وفى حالتنا هذه : $\Delta m = 1\ \text{u} = 1.6606 \times 10^{-27}\ \text{kg}$

$$\Delta E = 1.492 \times 10^{-10}\ \text{J} = 931.5\ \text{MeV}$$

ومن المناسب تذكر هذه الحقيقة : **إن وحدة كتل ذرية واحدة مكافئة لطاقة مقدارها 931.5 MeV .** ■

مثال 1-28

يمكننا أن نجد قيمة الكتلة الذرية للهليوم ^4_2He من اللحق رقم 2 وهى تساوى 4.002604 u . احسب طاقة الربط الكلية لنواته ، ومتوسط طاقة الربط لكل نوية .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى المعلومات التى أحصل عليها من طاقة الربط ؟

الإجابة : نحصل على الفرق بين الكتلة الكلية للنويات عندما تكون منفصلة وكتلتها عندما ترتبط معا لتكوّن نواة . وحاصل ضرب النقص الكتلى هذا فى مربع سرعة الضوء (c^2)

يساوى طاقة الربط الكلية . أو - كما وجدنا منذ قليل - فإن كل كتلة مقدارها u مكافئة لطاقة مقدارها 931.5 MeV .

سؤال : ما هى الكتلة الكلية للنويات المنفصلة ؟

الإجابة : لكل بروتون منفصل كتلة مقدارها 1.007276 u ولكل نيوترون منفصل كتلة مقدارها 1.008665 u . ومن ثمَّ تكون الكتلة الكلية للنويات الأربع عندما تكون منفصلة هى

$$m_{tot} = 2(1.008665\ u) + 2(1.007276\ u) = 4.031882\ u$$

سؤال : ما هى كتلة نواة $^{4}_{2}He$ المجردة ؟

الإجابة : إنها الكتلة الذرية المعطاة مطروحًا منها كتلة الإلكترونين ، ويمكننا إهمال المكافئ الكتلى المناظر لبعض وحدات من الإلكترون فولت والتى تمثل طاقة ربط الإلكترونات .

الحل والمناقشة : إن الكتلة النووية للهليوم ^{4}He هى

$$4.002604\ u - 2(0.000549\ u) = 4.001506\ u$$

أى أن النقص الكتلى يكون :

$$\Delta m = 4.031882\ u - 4.001506\ u = 0.030376\ u$$

أما طاقة الربط الكلية فهى :

$$\text{طاقة الربط} = (0.030376\ u)\ (931.5\ MeV/u) = 28.29\ MeV$$

وبالقسمة على 4 نجد أن :

$$\text{متوسط طاقة الربط لكل نوية} = \frac{28.29\ MeV}{4} = 7.073\ MeV$$

عليك مقارنة هذه النتيجة بالقيمة الواردة بالشكل 3-28 .

تمرين : تبلغ طاقة ربط الإلكترون فى ذرة الهيدروجين 13.6 eV . ما مقدار الكتلة ، بوحدات الكتل الذرية ، التى سوف تتولد عند تأين ذرة الهيدروجين ؟

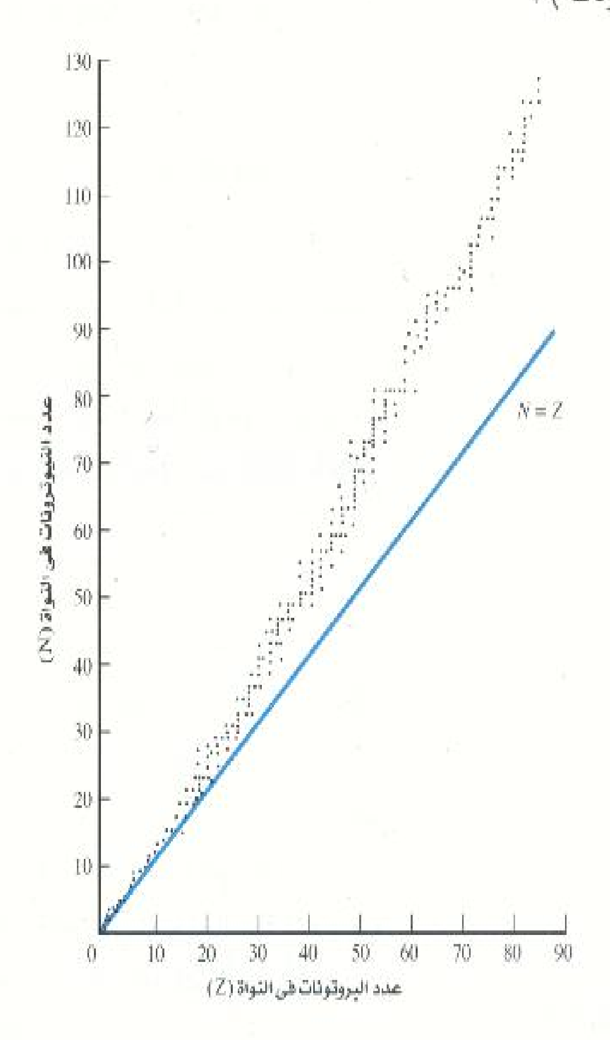
الإجابة : 1.46×10^{-8} . وهذه الكتلة من الصغر بحيث لا يمكن قياسها ، ولهذا فإن التفاعلات الكيميائية لا يمكن أن تتيح معلومات تتعلق بالتحول بين الكتلة والطاقة .

5-28 النشاط الإشعاعى

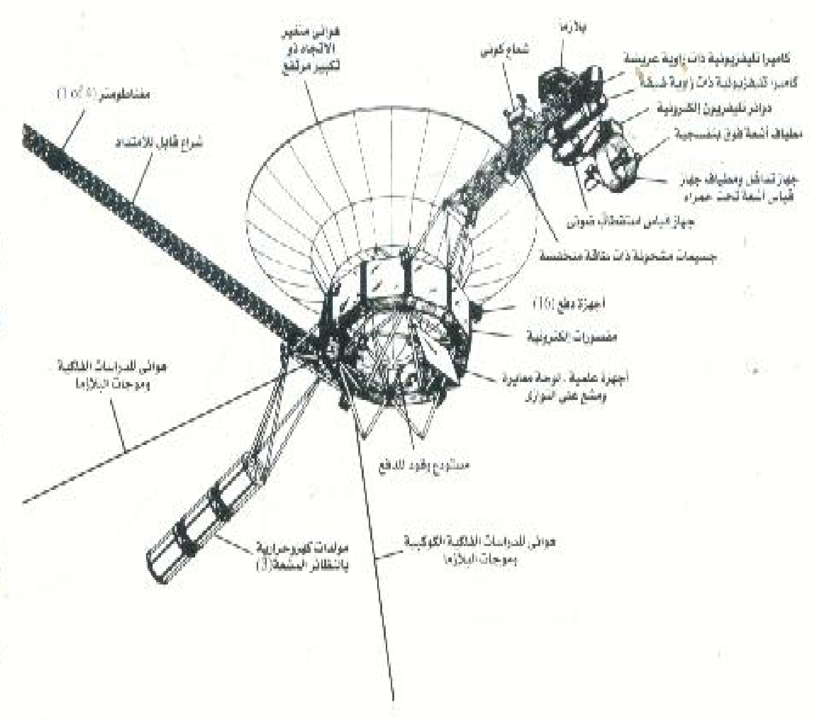
تتعرض النويات كما رأينا لقوتين متنافستين : قوة التجاذب النووية بين جميع النويات وقوة كولوم التنافرية بين البروتونات . وإذا كانت المجموعة تضم عددًا أكبر من اللازم من البروتونات بالنسبة لعدد النيوترونات ، فإن المجموعة ستتعرض لقوة تفجيرية كبيرة نتيجة التنافر الكولومى . أى أنها لن تكون قادرة على التواجد كوحدة مستقرة . وهناك عوامل أخرى أيضًا من شأنها التأثير على استقرار النواة كما سنرى لاحقًا . وليس هناك سوى عدد قليل من مجموعات البروتونات والنيوترونات التى تتمتع باستقرار نسبى ويوضحها الشكل 4-28 .

ولن يكون النوى الكبير مستقرًا إلا إذا كان يحتوى على نيوترونات أكثر من البروتونات كما هو واضح من الشكل 4-28 . أى أن فائض النيوترونات ضرورى من أجل « تخفيف » الشحنة الموجبة للبروتونات ، ومن ثم خفض التأثير التنافرى لقوى كولوم . وعلى الرغم من أن معظم النوى المشار إليه فى الشكل 4-28 مستقر تمامًا ، إلا أن تلك النوى التى يزيد فيها Z عن 83 ستكون غير مستقرة نوعًا ما .

يستطيع النوى غير المستقر أن يعانى تلقائيًا من تغير داخلى نحو حالة ذات طاقة أقل واستقرار أكبر . ويتم هذا بالتخلص من الطاقة الزائدة عن طريق طرد جسيمات وإشعاع كهرومغناطيسى أثناء عملية يطلق عليها **النشاط الإشعاعى** وقد اكتشف الباحثون الأوائل فى النشاط الإشعاعى (فى تسعينيات القرن التاسع عشر) الطاقة المنبعثة ، واستطاعوا باستخدام المجالات المغناطيسية إثبات وجود ثلاثة أنواع محددة من الطاقة : ذات الشحنة الموجبة ، وذات الشحنة السالبة والمتعادلة كهربيًا ؛ أما فيما عدا ذلك فقد كان الباحثون عاجزين عن تحديد هوية الإشعاعات ولذا أطلقوا عليها أشعة ألفا (α) وبيتا (β) وجاما (γ) (وهى الحروف الإغريقية المناظرة للحروف a ، b ، c) وقد صرنا نعرف حاليًا أن جسيمات α هى نوى ^4He وأن جسيمات β إلكترونات ، أما أشعة γ فهى موجات كهرومغناطيسية ذات طول موجى فى غاية القصر (أو فوتونات) .



شكل 4-28:
تمثل كل نقطة نواة إما مستقرة تمامًا أو بالتقريب ، أما الخط المتصل فيمثل مواقع النوى الذى به عدد متساو من البروتونات والنيوترونات .



تستخدم الطاقة المنطلقة أثناء الاضمحلال الإشعاعى فى توليد القدرة الكهربية اللازمة لتشغيل سفينة فضائية مثل « فويجر » المبينة بالشكل والنظير المستخدم هو البلوتونيوم ^{238}Pu الذى يبلغ عمر النصف له 89 سنة ومولدات النظائر المشعة الحرارية (RTG) مصممة بحيث تنتج 160 W من القدرة الكهربية وبجهد مقداره 30 V من التيار المستمر عند بدء الرحلة . هل يمكنك تقدير مدى الانخفاض فى القدرة الناتجة من المولد بعد مرور عشر سنوات من تشغيله فى رحلة سفينة الفضاء ؟

يعتقد العلماء أن النويات فى حالة حركة دائمة ، وأنها مشتركة فى محاولات دائبة للهروب من النواة ، ولكنها لا تنجح أبدًا فى الهروب من النوى المستقر . أما النواة غير المستقرة فإنها تستطيع خفض طاقتها وتصبح أكثر استقرارًا إذا أطلقت جسيمًا و / أو طاقة . وهى تفعل ذلك على أساس عشوائى تمامًا . ويمكننا تصور جسيمًا يحاول الهروب من النواة ، باذلاً العديد من المحاولات كل ثانية ، وفى لحظة مواتية ، تكون النواة فيها ذات تركيب داخلى يسمح للجسيم بالهروب ، نقول أن النواة قد قامت **بانحلال إشعاعى** .

وتعنى هذه اللعبة المستمرة للصدف داخل جميع النوى غير المستقر أن لكل نواة فرصة فى أن تنحل فى فترة زمنية Δt . دعنا الآن نتفق على أن الفرصة أو الاحتمال فى أن نواة ما ستنحل فى فترة زمنية Δt ، هو $\lambda\Delta t$ ، حيث سنطلق على λ **ثابت التفتت أو ثابت الاضمحلال** (يجب عدم الخلط بين هذا الرمز ورمز الطول الموجى) . فإذا كان لدينا عينة من مادة بها N نواة من هذا فإن العدد الذى سيضمحل فى فترة زمنية مقدارها Δt هو $N\lambda\Delta t$. ونستطيع من ثم أن نكتب :

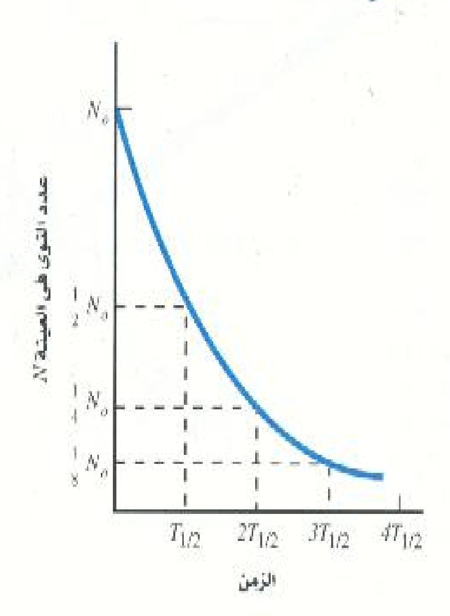
$$\Delta N = -N\lambda\Delta t \qquad (28\text{–}2)$$

وتشير الإشارة السالبة إلى أن المقدار ΔN سالب ، حيث أن N فى تناقص وسنطلق على المقدار $\Delta N/N$ **فاعلية العينة** ، وهى عدد الاضمحلالات التى تحدث فى وحدة الزمن ، وسوف نتناوله فيما بعد فى القسم 12-28 .

هب أن لدينا N_0 ذرة مشعة عند اللحظة $t = 0$. وسنقوم باستخدام المعادلة (2-28) لبيان كيفية تغير عدد الذرات التى لم تضمحل (N) مع الزمن ، والنتيجة مبينة فى الشكل 5-28 . ويطلق على هذا النوع من المنحنيات **منحنى الاضمحلال الأُسِّى** وسنعرض معادلة هذا المنحنى فى القسم التالى .

ويمكن إعطاء الاضمحلال الأُسّى الوصف البديل البسيط التالى :

تنخفض كمية المادة التى تقوم بالاضمحلال الأُسّى بمقدار النصف فى فترات زمنية متتالية ومتساوية ، تسمى كل منها عمر النصف لتلك المادة .



شكل 5–28:
يضمحل العنصر المشع أسيًا .

ويوضح الشكل 5–28 عمر النصف $T_{1/2}$. يلاحظ أنه فى كل نصف عمر متسلسل ينخفض عدد النوى المتبقى إلى النصف ، ومعنى هذا أنه بعد انقضاء عدد n من أعمار النصف فإن عدد النوى الذى تبقى ولم ينحل هو $(\frac{1}{2})^n N_0$.

تتباين أعمار النصف فى المواد المشعة تباينًا كبيرًا ، فعمر النصف لليورانيوم 238 يصل إلى 4.47 بليون سنة ، بينما يصل فى حالة الراديوم 226 إلى 1600 سنة أما غاز الرادون وهو العنصر الذى يصير إليه الراديوم عند اضمحلاله ، فيصل عمر النصف له إلى 3.8 يوم فحسب . كما أن الكثير من المواد المشعة التى تنتج صناعيًا لا يصل عمر النصف لديها إلا إلى كسر من الثانية . وعلى الرغم من أى شىء فكل هذه العناصر تضمحل طبقًا لنفس قانون الاضمحلال الأسى .

ومن الأهمية بمكان أن ندرك أن عمر النصف سلوك **إحصائى** لعدد ضخم من النوى ، ولذلك لا توجد طريقة للتنبؤ بالوقت الذى تضمحل فيه نواة بعينها . وقد تستغرق نواة راديوم منفردة ـ مثلاً ـ مليون سنة لتتحول إلى نواة أخرى بالاضمحلال بينما لا تستغرق نواة أخرى سوى ساعة واحدة ، على أنه فى حالة عينة ضخمة إحصائيًا (أى كمية ملموسة من عنصر ما تحتوى على تريليونات فوق تريليونات من النوى) يقوم نصف الراديوم بالاضمحلال إشعاعيًا فى 1600 سنة .

لقد أصبحت لدينا الآن طريقتان لوصف معدل الاضمحلال : λ أو $T_{1/2}$ ومن الطبيعى أن ترتبط هاتان الكميتان بشكل أو بأخر . واذا لجأنا إلى حساب التفاضل والتكامل ، لأمكننا إثبات أن :

$$\lambda T_{1/2} = 0.693 = \ln 2 \qquad (28\text{–}3)$$

وستأتى فرص كثيرة تحتاج فيها لاستعمال هذه المعادلة .

مثال توضيحي 4-28

تتم صناعة اليود 131 وهو نظير مشع فى المفاعلات النووية لكى يستخدم فى الطب إذ إنه حين يتم تناوله داخل الجسم ، يتجه نحو الغدة الدرقية ليتركز فيها ؛ حيث يصبح مصدرًا للإشعاع الذى يعالج مرض **زيادة نشاط الغدة الدرقية** . وعمر النصف لهذا النظير هو 8 أيام . هب أن أحد المستشفيات قد طلب كمية مقدارها 20 mg من ^{131}I وقام بتخزينها لمدة 48 يومًا . كم يتبقى من النظير ^{131}I الأصلى بعد هذه المدة (48) (يومًا) ؟

استدلال منطقى : يضمحل اليود إلى النصف كلما مرت 8 أيام ، ونستطيع من ثم وضع الجدول التالى :

الوقت (يوم)	0	8	16	24	32	40	48
اليود (mg)	20	10	5	2.5	1.25	0.625	0.313

أى أنه بعد انقضاء 48 يومًا لا يتبقى من 20 mg الأصلية سوى 0.313 mg . ■

مثال 2-28

وضع 1 g من ^{60}Co فى قنينة صغيرة ، فإذا كان عمر النصف لهذا النظير 5.25 سنة فما هى فاعلية العينة (أ) فى البداية و (ب) بعد تخزين القنينة لمدة 21 سنة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة الفاعلية ؟

الإجابة : لدينا من العادلة (2-28) $\Delta N/\Delta t = -\lambda N$. و N هنا هى مقدار المادة الموجودة عند اللحظة التى يتم فيها حساب الفاعلية ، λ وهو ثابت اضمحلال المادة . وتشير الإشارة السالبة إلى أن عدد نوى النظير ^{60}Co ، N يتناقص .

سؤال : ما هى العلاقة التى تربط بين ثابت الاضمحلال وعمر النصف ؟

الإجابة : بالرجوع إلى المعادلة 3-28 ، نجد أن $\lambda = 0.693\, T_{1/2}$. وعادة ما نعبر عن الفاعلية بعدد الاضمحلالات فى الثانية ، ولذا يجب التعبير عن $T_{1/2}$ بالثوانى .

سؤال : كيف تفيدنا الكتلة فى معرفة القيمة الابتدائية للعدد N ؟

الإجابة : لعلك تذكر أن 1 mol (عدد أفوجادرو N_A)من أية مادة ، فى كتلة من المادة (بالجرام) تساوى عدديًا كتلتها الذرية . ويمكنك اعتبار الكتل الذرية للنظير ^{60}Co مساوية لعدد الكتلة A وهو يساوى 60 ، إلى ثلاثة أرقام معنوية ولهذا فإن 1 g من ^{60}Co سيكون به $(1/60)N_A$ نواة .

سؤال : بالنسبة للجزء (ب) ، ما الذى يحدد عدد نوى ^{60}Co المتبقى بعد مرور 21 سنة ؟

الإجابة : لاحظ أن 21 سنة تمثل 4 أعمار نصف ، ولذلك تكون N على مدى 21 سنة هى $\frac{1}{16} = (\frac{1}{2})^4$ من القيمة الأصلية .

الحل والمناقشة : فى البداية كان $N = (\frac{1}{60})(6.023 \times 10^{23}) = 1.00 \times 10^{22}$ نواة
وتكون الفاعلية هى (ضع $5.25\ yr = 1.66 \times 10^8\ s$) .

$$\left|\frac{\Delta N}{\Delta t}\right| = \frac{0.693}{1.66 \times 10^8\ s}(1.00 \times 10^{22})$$

$$= 4.19 \times 10^{13}\ decay/s$$

أى أنه يتبقى بعد 21 سنة $(\frac{1}{16})(1.00 \times 10^{22}) = 6.25 \times 10^{20}$ نواة . وعلى هذا تكون فاعلية العينة بعد 21 سنة هى ببساطة $\frac{1}{16}$ من الفاعلية الأصلية ، أو 2.62×10^{12} اضمحلالا فى الثانية . يلاحظ أن ثابت الاضمحلال (وعمر النصف) بمثابة كميات مميزة لاضمحلال ^{60}Co بغض النظر عن مقدار N .

28-6 الاضمحلال الأسّى

منحنى الاضمحلال الأسى الوارد فى الشكل 5-28 ، معروف جيدًا فى العلم . وكما شاهدنا فى القسم السابق ، فإن ارتفاعه ينخفض بمقدار النصف كل فترة عمر النصف المثلة على المحور الأفقى . ويمكن تمثيل المنحنى فى صورة رياضية على النحو التالى :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (28-4)$$

حيث λ هو ثابت الاضمحلال ، والدالة $e^{-\lambda t}$ هى **الدالة الأسّية** ، أما e فهى قاعدة اللوغاريتم الطبيعى وتساوى 2.7183 .

واستعمال المعادلة 4-28 قد أصبح ميسورًا جدًا حاليا ، لأن معظم الآلات الحاسبة اليدوية بها زر (مفتاح) لهذه الدالة ؛ أما إذا لم تكن لديك آلة حاسبة بها هذه الإمكانية فيمكنك استخراج الدالة من جدول الدوال الأسية الموجود فى معظم المراجع .

مثال توضيحى 5-28

عمر النصف لليورانيوم 238 هو $4.5 \times 10^9\ yr$ ، ويعتقد أن الكرة الأرضية قد نشأت (صار بها أرض صلبة) منذ نحو $4.0 \times 10^9\ yr$. ما هو كسر اليورانيوم الذى كان موجودًا عند تكون الأرض وبقى دون اضمحلال إلى الآن ؟

استدلال منطقى : سنطبق قانون الاضمحلال بالمعادلة (4-28) :

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{4.5 \times 10^9\ yr} = 1.54 \times 10^{-10}\ yr^{-1}$$

ومنها نجد أن :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} = e^{-(1.54 \times 10^{-10}\ yr^{-1})(4 \times 10^9\ yr)}$$

$$= e^{-0.616} = 0.54$$

ومعنى ذلك أنه يوجد حاليًا 54 بالمائة من اليورانيوم 238 . ■

مثال 28-3

تبقى تسعون بالمائة (90%) من عينة من مادة مشعة بعد مرور $12.0\ h$. ما هما ثابت الاضمحلال وعمر النصف لهذه المادة ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هو مغزى هذه النسبة 90% ؟

الإجابة : هى النسبة بين العدد المتبقى من النوى إلى العدد الأصلى N_0 . وبعبارة أخرى هى قيمة N/N_0 عندما $t = 12\ h$.

سؤال : ما هى العلاقة الرياضية بين N/N_0 و t ؟

الإجابة : إنها المعادلة (4–28) : $N/N_0 = e^{-\lambda t}$.

سؤال : كيف أستطيع إيجاد مقدار مجهول موجود فى الأس ؟

الإجابة : لعلك تذكر الخاصية العامة التالية للوغاريتمات : $\log_a a^x = x$. ولذلك فإن :

$$\ln (N/N_0) = \ln e^{-\lambda t} = -\lambda t$$

ويمكن حلها جبريًا لإيجاد λ .

الحل والمناقشة : باستخدام الآلة الحاسبة نجد أن :

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = \ln 0.90 = -0.105$$

يلاحظ أن اللوغاريتم الطبيعى لأى كسر يكون دائمًا سالبًا . وعندما نتقدم فى الحل ستجد أن هذه الإشارة هى التى تجعل قيمة λ موجبة . والآن ، يمكننا إيجاد λ من :

$$-\lambda (12\ h) = -0.105 \qquad \lambda = 8.75 \times 10^{-3}/h = 2.43 \times 10^{-6}/s$$

ويكون عمر النصف هو

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{8.75 \times 10^{-3}/h} = 79.2\ h$$

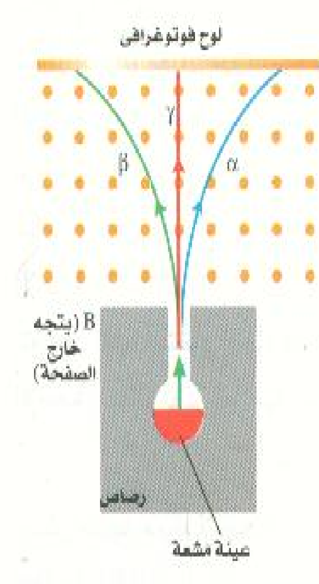
تمرين : ما هما ثابت الاضمحلال وعمر النصف إذا كان 20% يضمحل فى $40\ s$ ؟

الإجابة : $0.00558\ s^{-1}$ ، $124\ s$.

28–7 الانبعاثات من النوى ذى النشاط الإشعاعى الطبيعى

كل النوى ـ كما ذكرنا سلفًا ـ الذى عدده الذرى أكبر من 83 ذو نشاط إشعاعى . وقد لجأ الباحثون الأوائل إلى تجربة كالمرسومة فى الشكل 6–28 لفحص الإشعاع الصادر من مواد ذات نشاط إشعاعى طبيعى . لقد وضعوا عينة صغيرة داخل مركز كتلة من الرصاص بعد أن صنعوا ثقبًا تنفذ منه الإشعاعات المنبعثة من العينة على هيئة حزمة موجهة . وعندما يسمح للحزمة بالمرور فى منطقة بها مجال مغناطيسى مستعرض ، فإنها تنشق

إلى ثلاث مركبات) كما هو موضح بالشكل . ونستطيع أن نستنتج من الاتجاهات التى تنحرف إليها الأشعة أن إحدى المركبات لا شحنة لها ، وأن إحداها موجبة الشحنة ؛ أما الثالثة فسالبة الشحنة . وكما ذكرنا من قبل فإن هذه الإشعاعات أعطيت الأسماء : أشعة ألفا (α) وأشعة بيتا (β) وأشعة جاما (γ) ، نظرا لأنها لم تكن محددة فى الأصل . وسنعالج كلاً منها فى دوره .



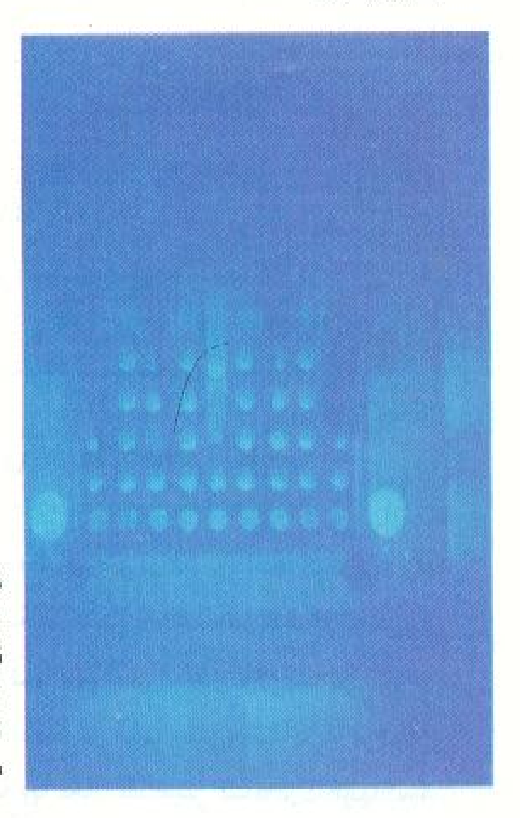
شكل 6–28:
ينفصل الإشعاع المنبعث من عينة مشعة إلى مركبات ثلاث بواسطة مجال مغناطيسى .

إشعاع جاما

يحدث أحيانًا أن تجد النواة نفسها فى حالة مستثارة من حيث الطاقة ، ولكى تعود إلى الحالة الأرضية فإنها تشع أشعة جاما ذات طاقة عالية . ولو أن النواة قامت بالانتقال من حالة ذات طاقة E_2 إلى حالة ذات طاقة E_1 فإن فوتون أشعة جاما الذى تطلقه تلك النواة ، سيكون تردده

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

وهذه العملية شبيهة بإطلاق فوتون ذرة ما عندما يتعدل تركيبها الإلكترونى لتتخذ حالة طاقة أدنى . وفوتونات جاما مثل فوتونات أشعة إكس من حيث الأساس على الرغم من أن الكثير من الانتقالات النووية ذات طاقات أكبر بكثير من الانتقالات الإلكترونية ولذلك فالفوتونات المنطلقة منها ذات أطوال موجية أقصر من الأطوال الموجية لأشعة إكس الناتجة من انتقالات الإلكترونات فيما بين القشرات الذرية . وعلى أية حال فاصطلاح شعاع جاما يطلق على الفوتون الذى تطلقه النواة بينما يطلق على فوتون مماثل شعاع إكس إذا كان منطلقاً خلال انتقال إلكترونى ذرى .



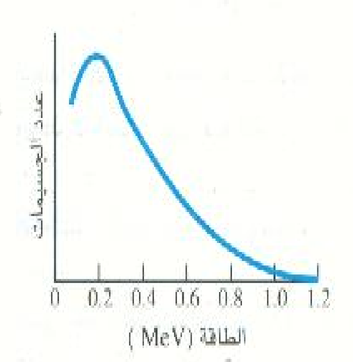
يسمى الضوء الأزرق الصادر من قلب مفاعل انشطارى – فى هذه الصورة – إشعاع تشيرينكوف . وهو ناتج عن دخول النيوترونات السريعة للغاية الناتجة من الانشطار إلى الماء ، وتكون سرعتها أكبر من سرعة الضوء فى الماء .

انبعاث جسيمات بيتا

يطلق الكثير من النوى المشع جسيمات بيتا (β) التى هى - ببساطة - إلكترونات . والعمليات التى تحدث داخل النواة عند حدوث انبعاث لجسيم β معقدة جدًا والنواة ليس بها إلكترونات ، ولذلك فإن العملية لابد أن تنطوى فعليًا على تحول نيوترون إلى بروتون وإلكترون . وتحتفظ النواة بالبروتون بينما ينبعث الإلكترون ويمكننا تمثيل انبعاث جسيم بيتا من نواة رمزها $^{A}_{Z}X$ كالتالى :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

حيث يرمز $^{0}_{-1}e$ إلى جسيم بيتا المنبعث (الإلكترون) ، يمثل $^{A}_{Z+1}Y$ النواة المتحولة ، أما $^{0}_{0}\bar{\nu}$ فيمثل نيوترينو ، وهو جسيم سنتناوله بتفصيل أكبر بعد قليل . وتحتوى النواة المتحولة على بروتون إضافى أكثر من الذى لدى النواة الأصلية ، ولذلك يصير عددها الذرى $Z + 1$ ، أما عدد الكتلة فيظل كما هو A لأن عدد النويات ظل كما هو داخل النواة ، كما أن عدد الكتلة لجسيم بيتا سيعتبر صفرًا نظرًا لضآلة كتلته .



شكل 7-28:
توزيع طاقة جسيمات β المنبعثة من $^{210}_{83}Bi$

خلافًا لما يحدث فى حالة انبعاث أشعة جاما ، حيث تنطلق الأشعة حاملة طاقة محددة تناظر فروق الطاقة بين حالات الطاقة للنواة ، فإن جسيمات β تنبعث بطاقات متباينة فى مدى عريض من قيم الطاقة . ويوضح الشكل 7-28 طيف طاقة جسيم بيتا نموذجيًا . على أن هذا ليس هو ما نتوقعه ، لأنه إذا انبعث جسيم β فمن المنطقى أن يحمل معه مقدارًا من الطاقة - قابل للاستعادة - ويناظر فرق الطاقة بين حالتى النواة الابتدائية والنهائية . ومن الحقائق المحيرة الأخرى حول انبعاث جسيم β هو أن كمية تحرك الإلكترون المنطلق ليست مساوية ومضادة فى الاتجاه لكمية تحرك ارتداد النواة . ولكى نجد تفسيرًا لهذا ، فقد تم افتراض أن جسيمًا ثانيًا غير مكتشف ، ينبعث سويًا مع جسيم بيتا ، وعلى هذا الجسيم أن تكون كتلة سكونه * صفرًا وشحنته صفرًا وقد منح هذا الجسيم الاسم **نيوترينو** . وقد تم التوصل إلى دليل معملى مباشر على وجود هذا الجسيم بالفعل فى منتصف خمسينيات القرن العشرين .

انبعاث جسيمات ألفا

تنبعث من بعض النوى المشع جسيمات **ألفا** (α) ، وهى ببساطة نوى هليوم (بروتونان ونيوترونان) ويمكن تمثيلها بالرمز $^{4}_{2}\alpha$ أو $^{4}_{2}He$. والاضمحلال عن طريق إشعاع جسيمات α يظهر بوضوح فى حالة نوى الراديوم :

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He + \gamma$$

وعمر النصف لهذا الانحلال هو 1600 yr . ويطلق على النواة الأصلية (الراديوم فى هذه الحالة) **النواة الأم** ، ويطلق على النواة النهائية (غاز الرادون الخامل) **النواة الوليدة** .

* هناك جدل حول ما إذا كانت كتلة سكون النيوترينو صفرًا تمامًا . على أن كتلته ، إذا كان له كتلة ، ستكون أصغر من كتلة الإلكترون بعدة رتب .

يكون اضمحلال ألفا مصحوبًا عادة بانبعاث شعاع جاما ، وفى هذه الحالات تتكون النواة الوليدة فى حالة مستثارة ، تصل فيما بعد إلى الحالة الأرضية إذا أطلقت شعاع جاما . وتتيح أشعة جاما هذه معلومات حول مستويات الطاقة بالنواة الوليدة .

مثال توضيحى 6-28

يضمحل الرادون 222 إلى البولونيوم 218 وذلك بواسطة انبعاث α . أوجد الطاقة التقريبية لجسم α المنبعث . والقيم المؤكدة للكتل الذرية هى $^{222}Rn = 222.01753\ u$ ، $^{218}Po = 218.00893\ u$ ، $^{4}He = 4.00263\ u$.

استدلال منطقى : الفقد فى الكتلة فى هذا التفاعل هو

$$\text{الفقد فى الكتلة} = 222.01753 - (218.00893 + 4.00263) = 0.00597\ u$$

وحيث أن $1\ u$ يكافئ طاقة مقدارها $931.5\ MeV$ ، فإن الطاقة المنطلقة هى

$$\text{الطاقة} = (931.5\ MeV/u)\,(0.00597\ u) = 5.56\ MeV$$

ويحمل جسيم α معظم هذه الطاقة ، حيث أن الطاقة التى قيست له هى $5.49\ MeV$. ويعود الاختلاف بين هذه القيمة والطاقة الكلية المفقودة ؛ إلى طاقة ارتداد النواة الوليدة . ■

28-8 التفاعلات النووية

تعتبر نظم اضمحلال جسيمات α و β التى وصفناها فى القسم الماضى نماذج بسيطة للتفاعلات النووية . ومعادلات التفاعلات النووية لابد أن تكون متوازنة مثل معادلات التفاعلات الكيميائية تمامًا . ولابد من أن تحقق التفاعلات النووية قوانين البقاء فى الفيزياء حتى يتم التوازن . وسنهتم حاليًا ببقاء الشحنة وعدد النويات فحسب .

ومجموع كل النويات فى أى تفاعل نووى (أو قيم A) على أحد جانبى التفاعل لابد أن يساوى المجموع على الجانب الآخر من التفاعل . وعلى ذلك ففى اضمحلال α ،

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

ومن الواضح أن قيم A متساوية على الجانبين ؛ $226 = 222 + 4$. وعلاوة على ذلك ، ولأن الشحنة أيضًا لابد من بقائها ، فإن مجموع قيم Z لابد أن تكون متساوية على الجانبين . وفى التفاعل الراهن فإن $88 = 2 + 86$.

وإلى جانب عدد النويات والشحنة فهناك كميات أخرى لابد أن تكون محفوظة ؛ وعلى التفاعلات النووية الخضوع لقوانين البقاء هذه . وقد أشرنا من قبل أن النيوترينو ينبعث أثناء اضمحلال β ؛ وبدون ذلك فإن تفاعل اضمحلال β سيفتقر إلى حفظ (بقاء) كمية التحرك الخطية والزاوية والطاقة . ولابد للطاقة أيضًا ، بما فى ذلك الطاقة المكافئة للكتلة ، أن تكون محفوظة فى التفاعلات النووية .

إن حقيقة كون الطاقة الكلية قبل التفاعل (بما فى ذلك الطاقة المكافئة لكتل السكون)

لابد وأن تكون مساوية للطاقة الكلية بعد التفاعل ، مفيدة جدًا كأداة لدراسة التفاعلات النووية . وعندما أجرى رذرفورد واحدًا من أوائل التفاعلات النووية عام 1918 ، مثلاً ، فقد أطلق جسيمات α على نوى النيتروجين ورصد التفاعل الآتي :

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

وبعبارة أخرى ، فإن جسيم α دخل إلى نواة ^{14}N ، التي تفتتت بإطلاق بروتون . أي أن نواة النيتروجين الأصلية قد **تحولت** إلى نواة أكسجين .

ولكي نعرف المزيد عن هذا التفاعل ، يمكننا الرجوع إلى الجدول الوارد في الملحق رقم (1) ، لكي نحسب كتل النوى المتفاعل قبل وبعد التفاعل :

الكتل قبل التفاعل	الكتل بعد التفاعل
كتلة ^{14}N = $14.0031\ u - 7\ m_e$	كتلة ^{17}O = $16.9991\ u - 8\ m_e$
كتلة ^{4}He = $4.0026\ u - 2\ m_e$	كتلة ^{1}H = $1.0078\ u - 1\ m_e$
الكتلة الكلية = $18.0057\ u - 9\ m_e$	الكتلة الكلية = $18.0068\ u - 9\ m_e$

يتضح من هذا أن كتلة النواتج أكبر من كتل المواد الداخلة في التفاعل ، بفرق يبلغ $0.0012\ u$. ولا يمكن إيجاد هذه الكتلة **إلا إذا أضيف مقدار من الطاقة إلى المجموعة** . وحيث أن $1.0\ u$ تكافئ طاقة مقدارها $931.5\ MeV$ ، كما رأينا في المثال التوضيحي رقم 3-28 ، لذا فإن الزيادة في الكتلة ، والتي ظهرت في هذا التفاعل ، تتطلب طاقة خارجية مقدارها $(0.0012)\ (931/1) = 1.1\ MeV$ ولابد لجسيم α الساقط من طاقة حركة بهذا المقدار على الأقل حتى يجعل هذا التفاعل قابلاً للحدوث . والواقع أنه لما كان لابد لكمية التحرك أن تظل محفوظة أيضًا في مثل هذا التفاعل ، فإن النواتج النهائية لن تقف ساكنة عن الحركة ، ونتيجة لذلك كان لابد أن يتخذ الجسيم طاقة أكبر من $1.1\ MeV$ حتى يكون التفاعل ممكنًا .

أما التفاعلات النووية التلقائية كالنشاط الإشعاعي فإنها تحدث لأن النواة تكون أكثر استقرارًا بعد التفاعل (أي أكثر ترابطًا) عن ذي قبل . ولكي نحدد ما إذا كانت نواة معينة مستقرة أم لا ، فإننا نستطيع أن نحدد أولاً النواتج التي ستؤول إليها ، بناءً على قوانين بقاء A و Z . ثم نستطيع أن نفحص كتل تلك النواتج ونقارن بين الكتلة الكلية لها وكتلة النواة الأصلية . فإذا حدث انخفاض في الكتلة نتيجة التفاعل ، فإن التفاعل سيحدث تلقائيًا باحتمالية معينة ، مع إطلاق مقدار من الطاقة يمثله النقص الكلي .

مثال 4-28

هب أن لديك نواة مكونة من 9 بروتونات ، 11 نيوترونًا ، وكتلتها الذرية $19.99999\ u$. (أ) ما هو هذا العنصر ؟ (ب) ما هي النواة الوليدة التي ستنتج لو أن النواة الأصلية مرت باضمحلال ألفا ؟ أو باضمحلال بيتا ؟ (جـ) هل تعتبر أيًا من عمليتي الاضمحلال هاتين ممكنة ، أو أن النواة الأصلية مستقرة ؟

1

استدلال منطقي :

سؤال : ما هو العنصر الذى له $Z = 9$ وما هو عدد الكتلة له A ؟

الإجابة : إنه عنصر الفلور F . $A = 20$ ولهذا يكون لدينا ^{20}F .

سؤال : ما الذى يفعله كل من اضمحلال α و β فى قيم Z و A للنواة الأم ؟

الإجابة : يقوم اضمحلال α بخفض قيمة Z بوحدتين ، وقيمة A بأربع وحدات . أما اضمحلال β فيزيد قيمة Z وحدة واحدة ولا يغير من قيمة A . ولذلك فالنواتان الوليدتان هما $^{16}_{7}N$ و $^{20}_{10}Ne$ ، على الترتيب .

سؤال : ما هو المبدأ الذى يحدد إمكانية حدوث الاضمحلال ؟

الإجابة : هو ما إذا كانت الكتلة الكلية قبل الاضمحلال أكبر أو أصغر عما ينتج بعد ذلك فإذا كانت أقل قبل الاضمحلال ، فإن الاضمحلال التلقائى لا يمكن أن يحدث .

سؤال : ما هى الكتل المشتركة فى اضمحلال α و β ؟

الإجابة : يمكنك العثور على البيانات التالية فى عدد من المراجع أو خريطة النويدات (النكليدات) بالنسبة للاضمحلال α $M(^4He) = 4.00260\ u$ و $M(^{16}N) = 16.00610\ u$ وبالنسبة لاضمحلال β $M(e-) = 0.00055\ u$ و $M(^{20}Ne) = 19.99244\ u$.

الحل والمناقشة : بالنسبة لاضمحلال α فإن مجموع الكتل بعد التفاعل هو

$$M_{tot} = 4.00260\ u + 16.00610\ u = 20.00870\ u$$

وهذا **أكبر** بمقدار $0.00871\ u$ من الكتلة الأصلية للفلور ^{20}F . ولذلك فإن اضمحلال α لن يحدث . ولإنتاج النواتج النهائية لاضمحلال α ، يتطلب الأمر **دخلاً** من الطاقة مقداره

$$(0.00871)(931.5) = 8.11\ MeV$$

ومن جهة أخرى ، فالكتل بعد اضمحلال بيتا سيكون مجموعها .

$$M_{tot} = 0.00055\ u + 19.9244\ u = 19.99299\ u$$

وهذا القدار أقل بنحو $0.00700\ u$ من الكتلة الأصلية ، ولذلك يستطيع ^{20}F (ولا شك سيفعل) إجراء اضمحلال β ليصير ^{20}Ne وهى نواة مستقرة . أما الطاقة التى ستنطلق خلال العملية فهى $(0.00700\ u)(931.5\ MeV) = 6.52\ meV$.

28-9 سلاسل النشاط الإشعاعى الطبيعى

لاشك أن الحيرة قد انتابتك عندما علمت بالحقيقة القائلة بأن الراديوم 226 موجود على الأرض حاليًا . إن عمر النصف لهذا العنصر ـ بغض النظر عن أى شيء ـ هو 1600 سنة ، بينما يبلغ عمر الأرض عدة بلايين من السنين . وإذا لجأنا إلى قانون الاضمحلال ، لوجدنا أن نسبة العدد الموجود حاليًا فى نوى الراديوم إلى العدد الذى كان موجودًا منذ 4×10^9 سنة يجب أن تكون :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-0.693t/T_{1/2}} = e^{-0.693(4 \times 10^9)/1600} \approx 10^{-740,000}$$

وهو كسر متناهى الصغر . ولابد لنا من استنتاج أنه تم تزويد الأرض بنوى راديوم جديد بعد أن انتهى منها النوى الأصلى . وإذا قمنا بحسابات مماثلة لوجدنا أن العديد من مصادر النشاط الإشعاعى الطبيعى ذات أعمار نصف أقصر بكثير من أن تفسر وجودها إلى الآن على سطح الأرض . دعنا ننظر فى كيفية وجود هذا النوى .

إن الراديوم والنوى المشع المماثل له موجودة على الأرض لأنها نواتج نظائر ذات عمر طويل للغاية . فاليورانيوم 238 ـ مثلاً ـ له عمر نصف يبلغ 4.47×10^9 سنة ، وهو يقارب فى ذلك عمر الأرض نفسها . إن نواة اليورانيوم هى النواة الأم لسلسلة كاملة من النوى المشع . وتضمحل نواة اليورانيوم تبعًا لنظام الاضمحلال :

$$ {}^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{234}_{90}\mathrm{Th} $$

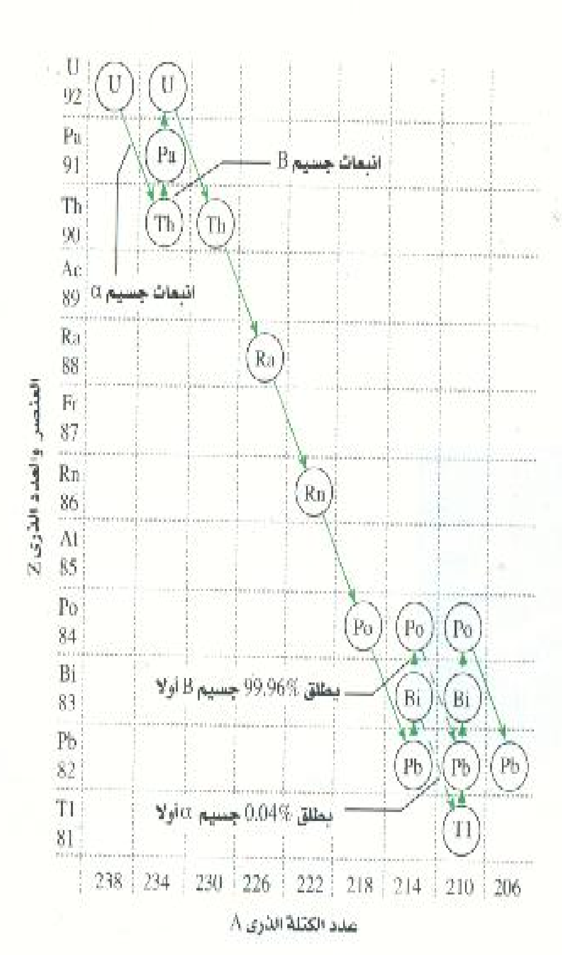
حيث النواة الوليدة هى نواة الثوريوم ، وهكذا يكون $^{238}\mathrm{U}$ هو المصدر الدائم لنظير الثوريوم ، الذى يضمحل بدوره بانبعاث β :

$$ {}^{234}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{234}_{91}\mathrm{Pa} + {}^{0}_{0}\bar{\nu} $$

حيث النواة الوليدة هى بروتاكتينيوم .

وينحل البروتاكتينيوم بدوره بانبعاث β إلى $^{234}\mathrm{U}$:

$$ {}^{234}_{91}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{234}_{92}\mathrm{U} + {}^{0}_{0}\bar{\nu} $$



شكل 8-28:
سلسلة نشاط إشعاعى نموذجية ، ويطلق عليها سلسلة اليورانيوم لأن النواة الأم هى اليورانيوم .

وتتضمن هذه السلسلة العديد من الخطوات الأخرى قبل الوصول إلى العنصر النهائى المستقر ، وهو فى هذه الحالة عنصر الرصاص ، ^{206}Pb . ويوضح الشكل 8–28 تفاصيل هذه السلسلة . ويلاحظ أن المراحل النهائية لنظام الاضمحلال لهذه السلسلة قد تنطوى على عدة بدائل ممكنة . ولكل إمكانية احتمال معين للحدوث كما يتضح من الشكل 8–28 لحالة ^{216}Bi . ويطلق على النسبة المئوية لإمكانيات الاضمحلال المختلفة **نسبة التفرع** بالنسبة لاضمحلال النواة الأم .

هناك أيضا سلسلتان طبيعيتان أخريان لاضمحلال النشاط الإشعاعى على الأرض . والجدول 1–28 يضم هاتين السلسلتين مع السلسلة التى تناولناها منذ قليل . ويلاحظ أن كلا من هذه السلاسل تبدأ بعنصر ذى عمر نصف طويل جدا وتضمحل فى نهاية الأمر لتصل إلى نظير مستقر للرصاص . ويفترض أن سلاسل اضمحلال أخرى قد وجدت على الأرض فى عصور سابقة ولكنها اضمحلت بسرعة أكبر من أن تكتشف فى وقتنا هذا .

جدول 1–28:
السلاسل الطبيعية للنشاط الإشعاعى

السلسلة	عنصر البداية	عمر النصف (سنة)	عنصر النهاية المستقر
اليورانيوم	$^{238}_{92}U$	4.47×10^{9}	$^{206}_{82}Pb$
الثوريوم	$^{232}_{90}Th$	1.41×10^{10}	$^{208}_{82}Pb$
الأكتينيوم	$^{235}_{92}U$	7.04×10^{8}	$^{207}_{82}Pb$

مثال توضيحى 7–28

إذا كان عمر الأرض 5×10^{9} سنة فما هو كسر الكمية الأصلية من ^{232}Th التى لا تزال موجودة على الأرض ؟ (يعتقد أن الأرض قد كانت منصهرة منذ ما قبل نحو 4×10^{9} yr)

استدلال منطقى : عمر النصف للنظير ^{232}Th هو 1.41×10^{10} yr ، ونعلم أن $N/N_0 = e^{-\lambda t}$. إلا أن $\lambda T_{1/2} = 0.693$ ولذلك $\lambda = 4.91\times10^{-11}\ yr^{-1}$. ومن ثم ،

$$\text{الكسر} = \frac{N}{N_0} = e^{-(4.91\times10^{-11}/yr)(5.0\times10^{9}\ yr)} = e^{-0.246} = 0.782$$

أى أن حوالى 78 بالمائة من ^{232}Th لازالت موجودة إلى اليوم .

تمرين : كم من السنوات يستغرق الثوريوم ^{232}Th الموجود على الأرض لكى ينخفض إلى ربع قيمته الحالية ؟ **الإجابة** : 2.82×10^{10} yr .

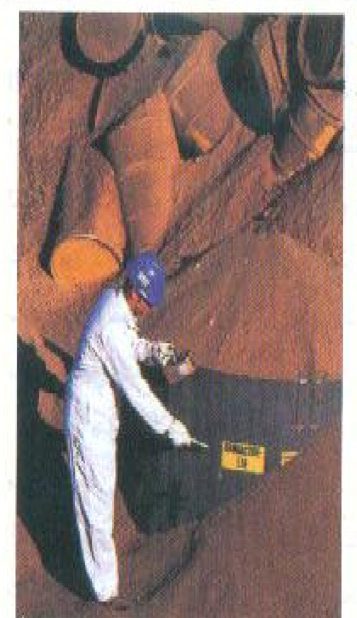
10–28 تفاعلات الإشعاع مع المادة

كلما زاد استعمالنا للقوى النووية ومصادر الإشعاع الأخرى ، كلما ازدادت أهمية الآثار التى يتركها الإشعاع على الجسم البشرى وعلى المواد المختلفة . فعندما يتغلغل جسيم داخل اللحم أو أية مادة أخرى فإنه يرتطم* بالذرات على طول مساره وبهذه الطريقة تحدث التأثيرات الرئيسية للإشعاع .



تكتشف أشعة إكس بسهولة بواسطة فيلم فوتوغرافى .

* لقد استخدمنا كلمة يرتطم بشكل غير دقيق ، فالجسيم إذا كان مشحونًا فإنه ليس بحاجة لأن يضرب إلكترونًا أو نواة حتى يحدث تلفًا ، لأن قوة كولوم المؤثرة على الإلكترونات والنوى من جانب الجسيم المشحون عادة ما تكون من الكبر بحيث تسبب التلف حتى لو لم يمر الجسيم بالقرب من الذرة . بل إنه حتى فى تصادم قريب مع ذرة أو جزئ ، فإن الجسيم قادر على تأيين الذرة أو جعل الجزئ يتهشم إلى أجزاء .



يمثل عداد جايجر أداة حساسة جدًا لقياس مستوى النشاط الإشعاعي .

وتعتمد التأثيرات التى يحدثها جسيم ذو طاقة عالية على ثلاثة عوامل أساسية : كتلة الجسيم ، وطاقته ، وشحنته . إن جسيم α ، يستطيع نظرًا لأن كتلته 4u- أن يحدث تلفًا أكثر من الذى يحدثه إلكترون (0.00055 u) يتحرك بنفس السرعة عندما يصطدم بذرة ما . مثلما أن شاحنة وزنها 10 طن تحدث دمارًا أكبر بكثير من الذى تحدثه عربة أطفال . زد على ذلك أن لجسيم ألفا شحنة مقدارها +2e فى حين أن شحنة الإلكترون e- ؛ فهى لذلك تؤثر بقوة كولومية أكبر على الشحنات القريبة أكثر مما يفعل الإلكترون . ولهذه الأسباب يقوم جسيم ألفا بتأيين الذرات على طول مساره بشكل أكثر تكرارًا مما يفعل إلكترون له نفس الطاقة . على أن كلاً من جسيم ألفا والإلكترون يستمران فى الحركة إلى أن يفقدا كل طاقتهما وإن كان الإلكترون يقطع مسافة أطول أخرى قبل أن يتوقف ، مقارنًا بجسيم ألفا الذى له نفس الطاقة الابتدائية . وبعبارة أخرى فإن مدى الإلكترون أكبر من مدى جسيم ألفا الذى له نفس الطاقة . والقيم التقريبية لمدى الجسيمات التى طاقتها 2 MeV فى الهواء هى 1 cm بالنسبة لجسيم α ، 10 cm بالنسبة للبروتون 1000 cm بالنسبة للإلكترون وكلما زادت كثافة المادة التى يخترقها الجسيم ، كلما كان المدى أقصر ، أى أن المدى يتناسب عكسيًا تقريبًا مع الكثافة . وعلى ذلك يكون مدى جسيم ألفا فى الهواء 10 cm (كثافة الهواء $\rho = 1.29\ kg/m^3$) فى حين أن المدى يصبح نحو 0.005 cm فحسب حين يمر خلال الألومنيوم $(\rho = 2700\ kg/m^3)$ ولعله قد أصبح واضحًا لديك لماذا يتم استخدام الرصاص ، وهو مادة عالية الكثافة ، فى الدروع الواقية من الجسيمات ذات الطاقات المرتفعة .

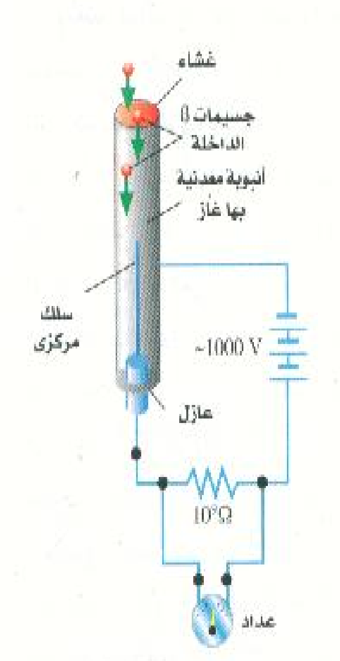
والنيوترونات ، التى لا شحنة لها هى جسيمات ثاقبة للغاية ، حيث أن قوى كولوم لا يمكن أن تؤثر عليها أثناء اختراقها للمادة . ولكى يتم إيقاف النيوترون أو إبطاء حركته لابد أن يصطدم مباشرة بنواة أو بجسيم آخر له كتلة مقاربة لكتلة النيوترون ولذلك تستخدم مواد مثل الماء والبلاستيك لإيقاف النيوترونات نظرًا لأنها تحتوى على الكثير من النوى ذى الكتل الصغيرة فى وحدة الحجوم .

وليس من السهل إيقاف أشعة جاما (وأشعة إكس) لأنها لا شحنة لها ولا كتلة سكون ، ولكنها تفقد طاقتها عندما تخترق المواد من خلال ظاهرة كومتون والأثر الكهروضوئى وهما عمليتان تؤديان إلى تكون الأيونات . ولابد أنك شاهدت صورًا بأشعة إكس للأسنان والعظام ولذا فأنت تعرف أن أشعة إكس تخترق اللحم وتكون ظلالاً للعظام . وكلما زاد عدد الإلكترونات فى ذرة ما داخل مادة تمتص الأشعة ؛ وكلما كانت تلك المادة أكثف ، كلما زادت قدرتها على إيقاف أشعة إكس وأشعة جاما .

28-11 الكشف عن الإشعاع

تستخدم فى معظم كاشفات الجسيمات والإشعاع ذات الطاقة المرتفعة ، حقيقة مفادها أن الأيونات تتكون على طول مسارات الجسيمات . وقد كانت المستحلبات الفوتوغرافية هى أول كاشفات للإشعاع ، وقد استخدمها بيكريل للكشف عن الإشعاع الصادر عن اليورانيوم عام 1896 . ويكمن عيب المستحلبات فى أنها لا تستخدم سوى مرة واحدة ، كما أنها تفتقر إلى الحساسية الفائقة للطرق الأحدث .

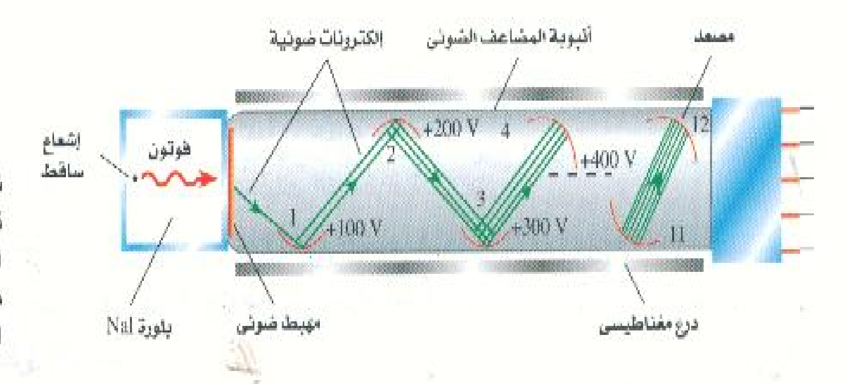
وهناك جهاز يتيح لنا أن نرى مسار الجسيم الذى يحدث التأين وهو **غرفة ويلسون السحابية** . وتتلخص فكرتها فى أن قطيرات من البخار فوق المشبع تفضل التكون على أيونات البخار . وعلى ذلك ، فإذا اخترق جسيم مؤين منطقة توشك قطيرات البخار أن تتكون فيها ، فإن تلك القطيرات ستتكون أولاً على طول مسار الجسيم بحيث يبدو المسار كآثار من القطيرات . وهناك جهاز آخر مشابه يسمى **الغرفة الفقاعية** ، يستخدم فيها سائل فائق التسخين ، أى سائل على وشك الغليان ، وتتكون فقاعات البخار بحيث تفضل مواقع الأيونات ولذلك تصبح مسارات الجسيم مرئية على هيئة آثار من الفقاعات .



شكل 9-28:
عداد جايجر .

أما الأجهزة الإلكترونية المستخدمة للكشف عن الجسيمات عالية الطاقة ، فاستخدامها مناسب وهى أكثر أنواع كاشفات الجسيمات شيوعًا . ومن نماذجها المألوفة **عداد جايجر** الذى يصوره الشكل 9-28 . عندما لا يكون هناك إشعاع داخل إلى العداد فإنه لا توجد شحنات فى الغاز الذى يملأ الأنبوبة المعدنية ولذلك لا يمر أى تيار فى الدائرة . أما إذا داخل جسيم مؤين إلى الأنبوبة فإن ما يحرره ما أيونات وإلكترونات تتحرك عبر الأنبوبة تحت تأثير المجال الكهربى القائم بين الأسطوانة والسلك المركزى . ويكون المجال الكهربى من الكبر بحيث تقوم الأيونات والإلكترونات بتأيين ذرات أخرى بالغاز كلما تحركت عبر الأنبوبة مما ينشأ عنه انهمار للشحنات . ونتيجة لذلك يصبح التيار المار عبر الأنبوبة أكبر بكثير من التيار الذى من الممكن أن ينشأ عن الأيونات الأصلية بمفردها . وبمجرد اختراق الجسيم للأنبوبة تمامًا ، فإن جميع الأيونات تُجمع ويختفى التيار ، وعلى ذلك يؤدى كل جسيم مؤين إلى ظهور نبضة تيار تسرى فى المقاوم . ثم تطبق نبضات الجهد الناتجة على نظام تسجيل إلكترونى يتيح تسجيلاً لعدد الجسيمات المؤينة التى دخلت إلى العداد .

تستخدم **عدادات الوميض** نوعًا من المواد التى ينطلق منها الضوء إذا ما اخترقتها جسيمات ذات طاقة كبيرة . ومن بين تلك المواد بلورات يوديد الصوديوم المحتوية على قليل من عنصر الثاليوم وكذا بعض أنواع البلاستيك العضوى . ثم تصطدم الفوتونات المنبعثة بواسطة الجسيمات الساقطة بمهبط أنبوبة المضاعف الضوئى فتنبعث منه إلكترونات ضوئية (الشكل 10-28) . وتتسارع هذه الإلكترونات فى جهد كهربى قيمته نحو 100 V لتصل إلى قطب ثان حيث ينتج كل منها عددًا من الإلكترونات الإضافية . وتتكرر هذه العملية عبر عدد من المراحل يتراوح بين 12 إلى 15 مرحلة ليتكون فى النهاية انهمار للإلكترونات ، وبالتالى نبضة تيار مكبرة عند خرج الأنبوبة . . وتعبر هذه النبضة عن وجود الجسيم الأصلى الذى اصطدم بالكاشف .



شكل 10-28:
تحول أنبوبة المضاعف الضوئى الفوتون الناتج من الإشعاع الساقط إلى نبضة مكبرة من الإلكترونات . ويعرف هذا الجهاز بعداد الوميض .

وتعتبر وصلة pn شبه الموصلة أحد أنواع الكاشفات ، وتستخدم بها نبضات تتولد عندما يتسبب شعاع جاما أو جسيم ما في وجود شحنات داخل شبه الموصل ولمثل هذه الكاشفات زمن استجابة سريع ، وهي رخيصة نسبيًا وذات كفاءة .

يعتمد ما نلجأ إليه من الكاشفات العديدة على نوع الجسيمات (أو الإشعاع) المراد قياسه ، وعلى مدى الطاقة الذى نتعامل معه ، وعلى مدى عدم الملاءمة الذى يمكن التسامح معه .

28-12 وحدات الإشعاع

لقد أصبحنا نهتم أكثر فأكثر في عالمنا المعاصر بتأثيرات الإشعاع ؛ وقد أصبح من الأمور المهمة فى حياتنا أن نعرف هل تلك التأثيرات ناشئة عن الفحوص الطبية والتشخيصية ، أم من الحوادث النووية ، أم من غاز الرادون الذى يتسرب إلى مساكننا من باطن الأرض . وقد تراكمت على مدار السنين وحدات كثيرة للإشعاع ، تستخدم لوصف آثاره مما نتج عنه كثير من اللبس . على أن وحدات SI (النظام الدولى) قد صارت حاليًا هي المهيمنة ، وأدى ذلك إلى التبسيط . وفيما يلى سنقوم باستعراض أهم الكميات المقاسة ووحداتها .

فاعلية المصادر

تعتبر **فاعلية** مصدر للإشعاع كما ذكرنا سابقًا ، هى عدد التفتتات التى تحدث فى المصدر فى وحدة الزمن :

$$\text{فاعلية المصدر} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \qquad (28\text{-}5)$$

حيث ΔN هو عدد النوى الذى يضمحل فى زمن مقداره Δt .

ووحدة SI للفاعلية هى **البيكريل** (Bq) ؛ والمصدر الذى فاعليته بيكريل واحد (1 Bq) هو الذى يحدث به تفتت واحد فى الثانية . وهناك وحدة أقدم من هذه وإن كانت لا تزال منتشرة وهى **الكورى** (Ci) حيث $1\ \text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq}$ تمامًا . ولكى تتصور حقيقة هذه الأرقام ، تشير إلى أن فاعلية مقدارها $(1\ \text{Ci})\ 3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq}$ أكبر ملايين المرات من حيث النشاط الإشعاعى من كثير من المصادر الطبية المشعة .

وسنلجأ إلى المعادلتين (2–28) و (3–28) ، لكى نحصل على المعادلة التالية للفاعلية بدلالة ثابت الاضمحلال وعمر النصف :

$$\text{الفاعلية} = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \frac{0.693 N}{T_{1/2}} \qquad (28\text{-}6)$$

وتطبيق هذه المعادلة مبين فى المثال التوضيحى 8–28 .

الجرعة الممتصة

يطلق اصطلاح **الجرعة الممتصة** على كمية الطاقة التى تمتصها وحدة الكتل من مادة تعترض مسار حزمة الإشعاع . والوحدات الدولية SI لـها هى جول لكل كيلو جرام J/kg وهى فى حالتنا هذه « **الجراى** » أو (Gy) . فإذا فرضنا أن حزمة إشعاع تخترق كتلة m وتودع فيها

مقدارا من الطاقة E ، فتكون الجرعة الممتصة من جانب المادة المكونة لهذه الكتلة هي :

$$\text{الجرعة الممتصة (Gy)} = \frac{E}{m} \qquad \text{J/kg}$$

وبعبارة أخرى فإن 1 Gy يكافئ طاقة ممتصة تساوى 1 J/kg . وهناك وحدة أخرى ، كثيرة الاستعمال وهي **الراد** rad - للتعبير أيضًا عن الجرعة الممتصة ، حيث 1 rad = 0.01 Gy .

الجرعة المكافئة بيولوجيًا (حيويًا)

لا يعتمد تأثير الإشعاع على الجسم البشرى على طاقة ونوع الإشعاع فحسب ؛ وإنما يعتمد أيضًا على المنطقة المعرضة من الجسم لذلك الإشعاع . ولكى نصف التأثيرات الحيوية للإشعاع فإننا نستخدم مقياسًا آخر للجرعة الإشعاعية وهى **الجرعة المكافئة حيويًا** ؛ وهى ببساطة الجرعة الممتصة مضروبة فى معامل يتضمن مقارنة تأثير الإشعاع المستخدم بتأثير أشعة إكس طاقتها 200 keV على اللحم . ووحدة هذه الجرعة هى « **السيفرت** » (Sv) . ولنضرب مثالاً على حزمة من جسيمات ألفا التى لها قدرة تدميرية على اللحم ؛ أكبر 15 مرة من قدرة أشعة إكس التى طاقتها 200 keV . فإذا كان لدينا جرعة مقدارها 1 Gy من جسيمات ألفا ، فإن الجرعة المكافئة حيويًا لأشعة إكس تكون 15 Sv . وعند تناول الإتلاف الإشعاعى للبشر والحيوانات ، فإن الجرعة المكافئة حيويًا تكون هى المقياس المناسب لذلك الإتلاف ، ومن الوحدات الأقدم وإن كانت لا تزال كثيرة الاستعمال ؛ وحدة « ريم » rem حيث 1 rem = 0.010 Sv .

مثال توضيحى 8-28

عمر النصف لعنصر الإسترونشيوم ^{90}Sr وهو 28 yr وهو من النواتج الخطيرة للتفجيرات النووية . ما هى فاعلية 1 g من ^{90}Sr ؟

استدلال منطقى : لدينا من المعادلة 6-28

$$\text{الفاعلية} = \frac{0.693N}{T_{1/2}}$$

وفى هذه الحالة $T_{1/2}$ = 28 yr أو 8.8×10^8 s . ولكى نحسب N ، وهو عدد الذرات من عنصر ^{90}Sr فى 1 g ، فإننا نذكر أن 1 kmol من ^{90}Sr (وهو 90 kg) يحتوى على 6.02×10^{26} ذرة . ولذلك .

$$N = \frac{0.001\ \text{kg}}{90\ \text{kg}}\,(6.02 \times 10^{26}) = 6.7 \times 10^{21}$$

وباستخدام هذه القيم نجد أن الفاعلية تساوى 5.3×10^{12} .

تمرين : ما مقدار نظير ^{90}Sr الذى ينتج عنه تفتت واحد فى الثانية .

الإجابة : **1.89×10^{-16} kg** .

28-13 أضرار الإشعاع

يستطيع الإشعاع إلحاق الضرر بأى مواد بما فى ذلك المادة المكونة لأجسادنا وذلك لقدرته على تمزيق الجزيئات . وسنفحص فيما يلى الآثار المترتبة على التعرض لمختلف مستويات جرعات الإشعاع على الجسم .

إن من أكثر أنواع الإشعاع شيوعًا وأثرًا على البشر ، الأشعة فوق البنفسجية فى ضوء الشمس ، إذ أنها تؤدى إلى حدوث لفحة الشمس واسمرار الجلد . فالفوتونات ذات الطاقة العالية تمزق جزيئات الجلد عند اصطدامها بها مما يؤدى إلى الآثار التى تشاهد بسهولة . إلا أن الأضرار فى هذه الحالة قليلة الأهمية . وتمتص معظم الأشعة فوق البنفسجية فى ضوء الشمس بواسطة غاز الأوزون فى طبقات الجو العليا . إلا أنه قد لوحظ فى السنوات الأخيرة تآكل طبقة الأوزون ، استنادًا إلى أدلة علمية آخذة فى التنامى . وقد يرجع السبب فى هذا جزئيًا إلى استخدام الأيروسولات (أوعية الرش التلقائى) التى تبعث بغاز الكلورفلوروكربون ، وكذلك من أجهزة التبريد . وهناك خطر قاتل من أن تزايد الإشعاع فوق البنفسجى الذى يصل إلى سطح الأرض قد يرفع من نسبة الإصابة بسرطان الجلد .

إننا نتعرض بشكل دائم لإشعاعات أخرى إلى جانب ضوء الشمس ، فكل المواد المحيطة بنا تقريبًا بها نسبة ضئيلة من المواد المشعة . وعلى هذا يتعرض جسمك إلى مستوى منخفض من الخلفية الإشعاعية ، لا سبيل إلى تجنبه . وعادة ما يتعرض كل إنسان إلى خلفية إشعاعية مقدارها تقريبًا 1 mSv سنويًا .

أما المستويات المرتفعة من الإشعاع الذى يغطى الجسم كله فإنها تمزق خلايا الدم إلى درجة خطيرة بحيث يصعب معها استمرار الحياة . وإذا زادت الجرعة التى يتعرض لها الجسم بأكمله عن 5.0 Sv ؛ فإن الموت يصير متوقعًا . وحتى الجرعة التى يتعرض لها الجسم بأكمله وتصل إلى 1.0 Sv ، فإنها قادرة على إحداث مرض إشعاعى خطير للغاية وإن كان غير مميت . أما الجرعات التى تقع فى مدى 0.30 Sv أو أعلى فإنها تحدث اضطرابات فى الدم . وإذا قلت الجرعات عن هذا فإن التأثيرات العامة على الجسم تصبح غير ملحوظة تمامًا ، وإن كانت عواقبها تظل خطيرة .

إن الجرعات الإشعاعية مهما كانت صغيرة ، ذات خطورة حقيقية إذا وصلت إلى المناطق التناسلية فى الجسم . ومثال ذلك أن جزيئات DNA فى أجسامنا والتى تحمل المعلومات المتعلقة بالتناسل ، قد تدمر نتيجة تعرض منفرد للإشعاع . وإذا تعرض عدد كاف من هذه الجزيئات للتلف ؛ فإن المعلومات التناسلية المشوهة تنتقل إلى الأجنة عند تكوينها . ويؤدى هذا إلى حدوث ولادات مشوهة . وعلى الرغم من أن هناك بعض الأدلة على أن المستويات المنخفضة من الاضطرابات التناسلية الشاذة قد تكون نافعة للجنس البشرى ، إلا أن معظم العيوب الخلقية ليست مستحبة . ولهذا السبب ، لا يجب أن **تتعرض أية أنثى فى سن الإنجاب لإشعاع لا ضرورة له وعلى الأخص للأعضاء**

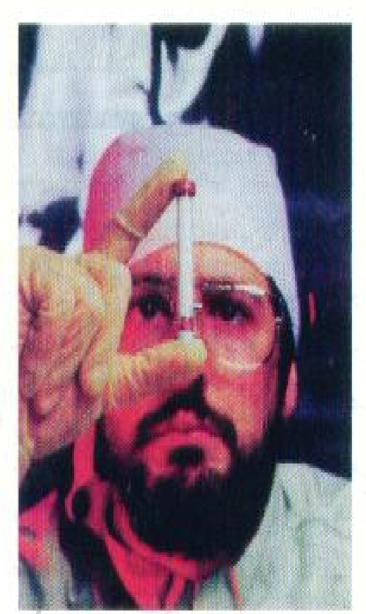
التناسلية . أما صور الأشعة التى تجرى للذراع ، مثلاً ، وبصورة صحيحة ، فإنها لا تشكل خطرًا .

تشكل مستويات الإشعاع المنخفضة - بالإضافة إلى تشوهات المواليد ، اثنين من المخاطر . فهى تنذر أولاً ، بحدوث إصابات بالسرطان فى وقت متأخر . فعلى الرغم من عدم ظهور السرطان على الفور ، فإن المستويات المنخفضة من الإشعاع قد تجعله يتكون على مدى سنين عديدة بعد ذلك . ويكمن الخطر الثانى فى أن الأطفال أكثر تأثرًا بالإشعاع . ولأن الطفل ينمو بسرعة ، فإن التغيرات التى تطرأ على الخلايا بسبب الإشعاع قد تكون لها عواقب وخيمة . ولهذا السبب يمتنع معظم الأطباء عن طلب إجراء مسح بأشعة إكس للأطفال ما لم تكن هناك ضرورة حتمية .

وحيث أننا جميعا معرضون لإشعاع من الخلفية المحيطة بنا مقداره 1.0 Sv/yr ، فإنه لا معنى لأن نتعذب فى محاولات لتجنب جرعات إشعاعية أقل من هذا . وكقاعدة عامة فإن الجرعات المهنية مهمة جدًا وقد تم تحديدها بأن الجرعة السنوية القصوى هى 0.050 Sv ، ويستثنى من ذلك العيون والأعضاء التناسلية .

28-14 الاستخدامات الطبية للنشاط الإشعاعى

لقد كان استخدام الإشعاع الصادر من الراديوم ونواتج اضمحلاله ، فى علاج السرطان ، من أوائل التطبيقات المبكرة للنشاط الإشعاعى . وقد حدث تطور هائل منذ ذلك الحين ، على طرق العلاج بالإشعاع وذلك بسبب إنتاج العديد من المواد المشعة الجديدة بفضل وجود المفاعلات النووية والمعجلات النووية .

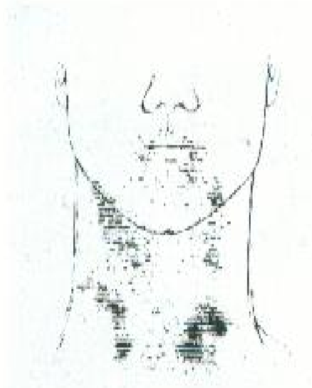


تستخدم النظائر المنتجة صناعيًا مثل التكنيسوم 99 ، على نطاق واسع كمقتفيات مشعة فى مجال الطب النووى .

ويعتبر الكوبالت ^{60}Co من أهم النظائر المتاحة للبحوث العلمية والتطبيقات التكنولوجية . ولهذا النظير عمر نصف مقداره 5.27 yr وهو مصدر قوى لأشعة جاما التى تصل طاقتها إلى 1.2 MeV تقريبًا . وإشعاع جاما شديد النفاذية ويستخدم لقتل الخلايا السرطانية التى توجد على عمق داخل جسم الإنسان .

كما يستخدم إشعاع اليود ^{131}I لعلاج سرطان الغدة الدرقية . وعمر النصف لهذا النظير 8 أيام . وعندما نتناول طعاما يحتوى على اليود فإن كثيرًا من اليود يتمركز فى الغدة الدرقية ؛ ولذلك يتم حمل اليود 131 الموجود فى الطعام مباشرة إلى تلك البقعة من الجسم حيث يكون إشعاعه مطلوبًا لعلاج سرطان الغدة الدرقية . على أن هذا ليس سوى حالة واحدة يتم فيها نقل النظير المشع إلى نقطة محددة داخل الجسم حتى يتسنى وصول إشعاع موضعى ذى كفاءة عالية .

وتستخدم النظائر المشعة أحيانًا كعناصر اقتفاء حتى يتسنى تتبع مسار المواد الكيميائية الداخلة إلى الجسم . فلو أننا لم نكن بالفعل نعرف أن اليود يتركز فى الغدة الدرقية ، مثلاً ، فإن بمقدورنا التأكد من ذلك بملاحظة موقع النشاط الإشعاعى داخل الجسم بعد ابتلاع اليود 131 . ويستخدم علماء الحياة تقنيات مشابهة للتعرف على كيفية استفادة النبات من الكيماويات المختلفة .

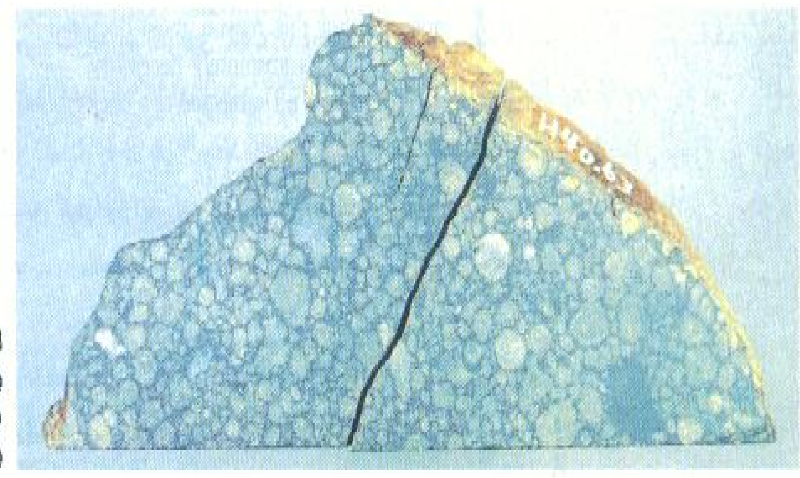


يوضح الشكل 11-28 استخداماً آخر طبياً للنشاط الإشعاعى . لقد تناول المريض الموضح بالشكل النظير جادولينيوم 67 وذلك بحقنة فى مجرى الدم . ويستقر هذا النظير عادة فى أنواع معينة من الأنسجة السرطانية . وكما هو مشاهد فى الشكل ، فإن النشاط الإشعاعى (وهو ممثل بالمناطق المظللة) قد تركز فى النسيج الليمفاوى للحلق والعنق وهذا ما يهيئ دليلاً قوياً على موقع السرطان عند هذا المريض .

شكل 11-28: يستقر الجادولينيوم 67 المشع ، الذى تم اقتفاؤه فى المسح الضونى هنا ، مفضلاً الأنسجة السرطانية .

15-28 التأريخ بالنشاط الإشعاعى

من التطبيقات المثيرة للاهتمام ، استخدام النشاط الإشعاعى فى تحديد عمر المواد القديمة . فيمكننا ـ على سبيل المثال ـ تحديد عمر الصخور الحاملة لعنصر اليورانيوم بالطريقة التالية . فحيث أن اليورانيوم 238 يضمحل ليؤول إلى الرصاص 206 (راجع الشكل 8-28) فإننا نخمن أن الرصاص 206 المختلط بشدة باليورانيوم 238 فى صخرة ما قد نشأ من اليورانيوم الذى اضمحل عبر السنين . افترض الآن أن تحليل الصخور قد اثبت أن أعداد ذرات كل من اليورانيوم والرصاص فى وحدة الحجوم هى N_U و N_{Pb} على الترتيب . وعلى ذلك تكون النسبة بين مقدار اليورانيوم الموجود حالياً إلى المقدار الذى كان موجوداً منذ فترة t من الزمن ، عندما تجمدت الصخور المنصهرة هى :

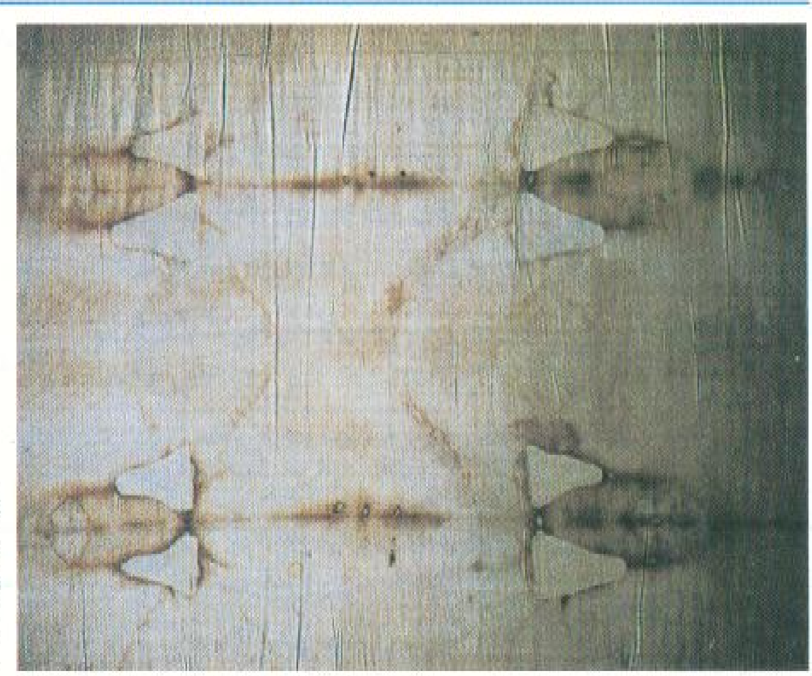


لقد أمكن تحديد عمر هذا النيزك باستخدام التأريخ بالنشاط الإشعاعى بطريقة الروبيديوم/الإسترونشيوم ، ووجد أنه 4.5 بليون سنة .

$$\frac{N_U}{N_U + N_{Pb}} = e^{-\lambda t} = e^{-0.693t/T_{1/2}}$$

حيث $T_{1/2}$ هو عمر النصف لليورانيوم 238 وهو 4.5×10^9 yr . وأقدم الصخور عمراً على الأرض هى تلك التى بها $N_U \approx N_{Pb}$ ولذلك نقدر أن الأرض قد تجمدت منذ مدة تساوى عمر نصف واحد لليورانيوم 238 تقريباً .

وقد استخدم نظام اضمحلال إشعاعى آخر ، على نطاق واسع ، لتأريخ عينات من صخور القمر والنيازك ، ويعتمد على اضمحلال β للنظير ^{87}Rb $(T_{1/2} = 4.88 \times 10^9$ yr$)$ التى يتحول إلى ^{87}Sr . وحيث أن أقدم صخور القمر عمراً وكذلك النيازك هى ما تكونت فى المراحل المبكرة جداً للنظام الشمسى ، فإن الفلكيين يعتبرون نتائج هذه الطريقة مفيدة



لقد كان أصل أكفان تورينو من الأسرار المحيرة ، ولكن الدراسات التى تمت باستخدام الكربون 14 قد أوضحت أن تلك الأكفان تعود إلى القرن الحادى عشر الميلادى تقريبا .

للحصول على تقدير لعمر الشمس والكواكب . وتدل التقديرات المبنية على عينات من نوعي الصخور على أن أقصى عمر تقريبى هو 4.6×10^9 yr بخطأ مقداره $\pm 0.1 \times 10^9$ yr تقريبًا . كما أن هناك نظائر مشعة أخرى تؤدى القياسات المستقلة لها إلى نفس العمر تقريبًا .

ولكي يمكن تحديد عمر الأشياء التي كانت في وقت من الأوقات حية كالخشب والعظام فإن العلماء يستخدمون تقنية تسمى التأريخ **بالكربون المشع** ، ويستخدم فيها النظير المشع للكربون C 14 . ويتم إنتاج هذا النظير بشكل دائم على الأرض نتيجة قذف نيتروجين الجو بالأشعة الكونية القادمة من الفضاء الخارجي . وعمر النصف لهذا النظير 5730 yr . وحيث أن الكربون المشع مطابق كيميائيًا للكربون ^{12}C ، فإن كل الكائنات الحية تحتوى على مزيج متلاحم من هذين النظيرين . وبمرور السنين ، فإن نسبة الكربون 14 إلى الكربون 12 تتخذ قيمة متوسطة هى 1.30×10^{-12} . إلا إنه عندما تموت شجرة مثلاً ، فإن الكربون 14 فى خشبها لن يمكن تجديده ، ولذلك يضمحل مقدار الكربون 14 بداخلها بعمر نصف مقداره 5730 yr ، وبمرور الزمن تتناقص النسبة $^{14}C/^{12}C$ وتتضاءل كذلك فاعلية الجرام الواحد من عينة ما . ويمكن استخدام هذه الحقيقة فى تعيين طول الفترة الزمنية التي انقضت منذ موت الشجرة .

مثال توضيحى 9-28

ما هو عدد العدات فى الدقيقة ، الذى تحصل عليه من عينة كتلتها 1 g من الكربون المأخوذ من قطعة جديدة من الخشب أو الألياف ؟

استدلال منطقى : تبلغ وفرة ^{14}C نحو 1.3×10^{-12} ، ويحتوى الجرام الواحد من الكربون على $(1/12)N_A$ ذرة ، ولذلك فهناك :

$$(1.30 \times 10^{-12})\left(\frac{1}{12}\right)(6.02 \times 10^{23}) = 6.52 \times 10^{10}$$

ذرة من ^{14}C في جرام واحد جديد من عينة من الكربون . وفاعلية هذا العـدد مـن النـوع المشع هي

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda t = \frac{0.693}{5730\ \text{yr}}(6.52 \times 10^{10})$$

$$= 7.89 \times 10^{6}\ \text{counts/yr} = 15.0\ \text{counts/min}\ ■$$

مثال 28-5

هب أنك قد حصلت على قطعة عظام بشريـة مـن أحـد الكـهوف . وعنـد اخـتزال تلـك القطعة إلى كربون نقي فإن جرامًا واحدًا منه كان ذا فاعلية مقدارها 4 عدات في الدقيقـة ناتجة من ^{14}C . منذ كم من الوقت كان يعيش ساكن ذلك الكهف ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هي العلاقة التي تربط بين الفاعلية وعمر العينة ؟

الإجابة : تتناسب الفاعلية مع وفرة ^{14}C الموجودة لحظة قياس عدد العدات :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\left(\frac{0.693}{T_{1/2}}\right)N$$

وعمر النصف مقدار ثابت بالنسبة لنظير مشع معين .

سؤال : ما هي العلاقة بين الفاعلية المشاهدة والفاعلية التي مقدارها 15 عَدّة في الدقيقة لعينة من الكربون الحالي (المثال التوضيحي 9–28) ؟

الإجابة : إن النسبة بين الفاعليتين تساوي النسبة بين عددي ذرات ^{14}C في العينتين :

$$\frac{N\ (\text{في العينة القديمة})}{N\ (\text{في العينة الجديدة})} = \frac{4}{15}$$

سؤال : ما هي العلاقة بين فاعليتي العينة القديمة والعينة المعاصرة ؟

الإجابة : $\frac{4}{15} = \frac{N_0 e^{-\lambda t}}{N_0} = e^{-\lambda t}$

الحل والمناقشة : باستخدام العلاقة $\lambda = 0.693/T_{1/2}$ ، نجد أن

$$\frac{4}{15} = 0.267 = e^{-(0.693/5730\ \text{yr})t}$$

$$\ln 0.267 = -1.32 = -\left(\frac{0.693}{5730\ \text{yr}}\right)t$$

ومنها نجد :

$$t = \frac{(1.32)(5730\ \text{yr})}{0.693} = 10{,}900\ \text{yr}$$

إن معدلات العد المتناهية في الضآلة بالنسبة للجرام من عينة يعود عمرها إلى أكثر من 4 إلى

5 أعمار نصف ، تتطلب عينات ذات حجم أكبر وعناية فائقة ويصل الحد الأقصى ـ حاليًا ـ للتأريخ بالنشاط الإشعاعي إلى نحو 8 إلى 9 أعمار نصف أو من 40,000 إلى 50,000 سنة .

28-16 التفاعل الانشطاري

لقد اتضح بعد اكتشاف النيوترون (عام 1930) أن هذا الجسيم المتعادل قادر على الدخول في تفاعلات نووية ، فهو يدخل إلى النواة بسهولة نظرًا لعدم وجود شحنة عليه . ويعتبر العالم إنريكو فيرمى هو الرائد فى استخدام هذا المقذوف الجديد ، واستطاع فى منتصف ثلاثينيات القرن العشرين أن ينتج العديد من النظائر التى كانت قبل ذلك مجهولة . ثم كان طموحه الرئيسى أن يقذف النوى الثقيل بالنيوترونات حتى ينتج عناصر ذات عدد ذرى Z أكبر من أية قيمة معروفة وقتها . وقد صادف النجاح بعض جهوده ، وأستأنف آخرون ما بدأه فيرمى وأمكن الآن إنتاج نوى يصل عدده الذرى إلى $Z = 107$.



(أ) (ب)

(أ) تستخدم المفاعلات النووية فى كثير من الأغراض المفيدة بما فى ذلك توليد القدرة الكهربية على نطاق تجارى ، إنتاج النظائر المشعة المستخدمة للتشخيص والعلاج الطبيين وكذلك فى البحوث الفيزيائية الأساسية . والمفاعل المبين فى الصورة فى مفاعل للاختبارات المتقدمة فى « إيداهو فولز » . وقد أسهم هذا المفاعل بشكل كبير فى تحسين تصميم وتكنولوجيا المفاعلات .

(ب) توضح الصورة كيفية إخراج عنصر الوقود من باطن مفاعل للنظائر ذى الفيض المرتفع فى المعمل القومية فى أوك ريدج . ومرة أخرى نلاحظ إشعاع شيرينكوف الأزرق الناتج من النيوترونات التى تمرق (فى الماء) بسرعة أكبر من سرعة الضوء والتى تصدر نتيجة التفاعلات الانشطارية و ينتج هذا المفاعل الذى قدرته 100 MW، أعلى فيض نيوترونى فى العالم ، وهو حجر الزاوية فى عمليات إنتاج وبرامج بحوث العناصر الأثقل من البلوتونيوم .

عندما قذف فيرمى اليورانيوم بنيوترونات ذات طاقة منخفضة جدًا تسمى **النيوترونات الحرارية*** ، فقد وجد بالفعل أن تفاعلاً مصحوبًا بإطلاق طاقة قد

* للنيوترونات الحرارية (ويشار إليها أحيانًا على أنها نيوترونات بطيئة) طاقات مساوية تقريبًا لمتوسط الطاقة الحرارية التى تحددها درجة حرارة الأجسام المحيطة بها kT . وعند درجة حرارة الغرفة فإن هذه الطاقة نحو 1/40 eV ، وهى أقل كثيرًا من الطاقة التى تصل إليها عندما تتكون كنواتج للتفاعلات النووية . وعلى الجانب الآخر فإن النيوترونات « السريعة » ، هى تلك التى طاقاتها 1 MeV أو أكثر . وتصبح النيوترونات السريعة نيوترونات حرارية عند مرورها بالعديد من التصادمات المؤدية إلى فقد الطاقة مع المواد المحيطة بها .

حدث . وباستئناف العمل من حيث تركه فيرمي ، فقد أجرى أوتوهاهن وفريتزستراسمان (عام 1939) تحليلاً كيميائيًا لنواتج التفاعل ؛ ووجدا لدهشتهما ، كثيرًا من العناصر ذات العدد الذرى الذى يدور حول $Z = 50$ ، من بين نواتج التفاعل . وكان الباريوم ، على وجه الخصوص هو أحد نواتج التفاعل . ماذا يمكن أن يكون قد حدث ؟ لقد أضافوا نيوترونًا واحدًا إلى نواة اليورانيوم ($Z = 92$) . وانتهى الأمر بالحصول على عنصر (الباريوم) عدد الذرى $Z = 56$. وعلاوة على ذلك ، فقد كانت هذه النيوكليدة ذات نشاط إشعاعى مرتفع ، مع أن الباريوم العادى مستقر .

لقد تشبثت ليز مايتز وابن أخيها أوتوفريس بأعمال هاهن وستراسمان واكتشفا تفسيرًا لهذه النتائج المحيرة . لقد أوضحا أن نواة اليورانيوم تقبض على النيوترون وتظل محتفظة به لكسر من الثانية ، ثم تنفجر إلى نواتين متساويتين بالتقريب فى الحجم . (راجع الشكل 12-28) . وقد أطلق على النواة فى المرحلة الوسطى اسم **النواة المركبة** . وينطلق فى التفاعل إلى جانب الطاقة ، نيوترونان أو ثلاثة . وانقسام النواة إلى شظيتين ذواتى حجم متساوٍ* وهو ما اصطلح على تسميته **الانشطار النووى** . وعلى الرغم من أن اكتشاف الانشطار النووى لم يكن فى **البداية** سوى فضول علمى بسيط عندئذ ؛ إلا أنه أسهم بشدة فى تغيير مسار التاريخ فيما بعد .

لقد أوضحت التحليلات التالية لهذا التفاعل أن هناك نظيرًا واحدًا فقط لليورانيوم هو الذى يوجد فى الطبيعة بكميات ، وهو القادرة على الانشطار بهذه الطريقة ، وهو اليورانيوم 235 الذى يمثل 0.7% فقط فى الخليط الطبيعى لنظائر اليورانيوم . والخطوة الأولى لحدوث تفاعل انشطارى هو اقتناص نيوترون (n) بواسطة ^{235}U لتكوين نواة مركبة :

$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U^*$$

حيث تعبر U^* عن النواة المركبة ، التى سرعان ما تضمحل عن طريق واحد من عدة تفاعلات محتملة . والتفاعل التالى ليس سوى أحد هذه الاحتمالات :

$${}^{236}_{92}U^* \rightarrow {}^{140}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 4\,n + \text{طاقة}$$

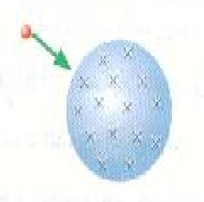
ونواتج التفاعل ليست نظائر ^{84}Kr ، ^{138}Ba المستقرة الموجدة فى الطبيعة . ومن ثم فهى تضمحل إلى نظائر أخرى ، وهذه تضمحل بدورها إلى نظائر تالية إلى أن نصل إلى الاستقرار . ونتيجة لهذا تكون نواتج التفاعل الانشطارى على درجة عالية من النشاط الإشعاعى ، والمواد المتفاعلة بمثابة مصدر قوى للإشعاع . على أن ما هو أهم من ذلك ، انطلاق كميات ضخمة من الطاقة نتيجة التفاعل .

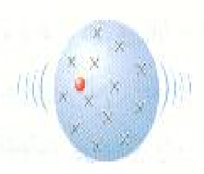
ويمكننا الحصول على فهم لمصدر الطاقة المنطلقة إذا رجعنا إلى الشكل 3-28 الذى يبين قيم طاقة الترابط لكل نوية فى مختلف النوى . ولعلك تذكر أن النوى الذى له طاقة ربط عالية هو الذى له أيضًا كتلة لكل نوية أقل مما لدى النوى الذى طاقة ربطه

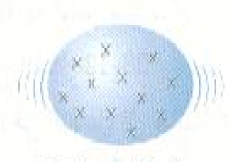
* تتوزع شظايا الانشطار التى تنشأ من عينة كبيرة من الانشطارات إحصائيًا إلى مجموعة ذات كتل صغيرة تتمركز حول 40% من الكتلة الأصلية ومجموعة ذات كتل كبيرة تتمركز حول 60% منها .

أقل . ويدل الرسم البياني أن الكتلة لكل نوية في الباريوم (Ba) ، مثلاً ، أقل من تلك التي لدى اليورانيوم . وبناء على ذلك ، إذا انشقت نواة اليورانيوم إلى نواتين لكل منهما عدد ذرى Z قريب من 50 فإن النويات ستفقد كتلة في العملية . وهذه الكتلة المفقودة تنطلق على هيئة أشكال مختلفة للطاقة بما في ذلك الإشعاع وكذلك طاقة حركة النيوترونات ونواتج التفاعل الأخرى . وفي حالات الانشطار المتوسط لليورانيوم ^{235}U ، تصل الطاقة المنطلقة نحو 200 MeV وهي طاقة هائلة بالتأكيد .

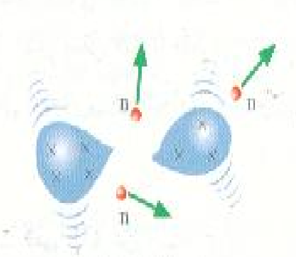
وأفضل الطرق لفهم عملية الانشطار هي باعتبار النواة الثقيلة كما لو كانت تسلك سلوك قطرة من سائل . وكما يتضح من الشكل 12-28 ، فإن إضافة نيوترون إلى النواة يجعل النواة تأخذ في الاهتزاز بشكل عشوائي مما يجعل موقفًا يطرأ كالذى يصوره الشكل 12-28 (د) . وفي هذه الحالة يتضاءل تأثير قوة التجاذب بسبب الزيادة الكبيرة في مساحة سطح النواة . وفيما يلي ذلك فإن قوى كولوم التنافرية تتولى دفع جزئي النواة بعيدًا عن بعضهما أكثر فأكثر ، ويحدث الانشطار للنواة ، كما هو موضح في الشكل 12-28 (هـ) . وتنطلق النيوترونات وتكون شظيتا الانشطار على درجة عالية من الاستثارة وعدم الاستقرار .


(أ) قبل التفاعل . $n + {}^{235}U$


(ب) بعد التفاعل . ^{235}U "


(جـ) القطيرة المهتزة


(د) تقوم قوى كولوم بمط النواة

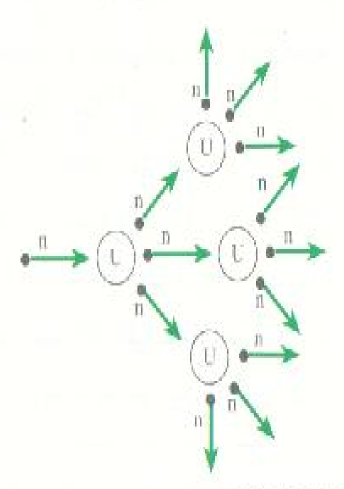


(هـ) اكتمل الانشطار

شكل 12-28:
يؤدى اهتزاز النواة المركبة إلى انشطارهـا في نهاية الأمر .

حيث أن انشطار نواة ^{235}U واحدة يؤدى في المتوسط إلى إنتاج ثلاثة نيوترونات وحيث أن النيوترونات هي التي تستحث نوى ^{235}U على الانشطار لذا فإن التفاعل المستمر ذاتيًا يصبح ممكنًا . تخيل كتلة من ^{235}U من الكبر بحيث يكون عدد النيوترونات التي تهرب من سطحها ضئيلة جدًا مقارنة بالعدد الكلي للنيوترونات ومن ثم ، إذا اقتحم نيوترون نواة ^{235}U ، فإنه يؤدى إلى ظهور ثلاثة نيوترونات ، مثلاً ، عندما تنشطر النواة . (لقد وجد بالتجربة أن العدد المتوسط لتلك النيوترونات هو 2.47) . وتقوم النيوترونات الثلاثة هذه بجعل ثلاث أنوية أخرى تنشطر ، فيتحرر بذلك ما مجموعه $3^2 = 9$ نيوترونات . وهذه النيوترونات تؤدى إلى انشطار مجموعة أخرى من النوى فينتج 3^3 نيوترونًا ، وهكذا . وهذه العملية التي يصورها الشكل 13-28 هي المسماة **بالتفاعل المتسلسل** وإذا تكررت q خطوة في التفاعل المتسلسل ، يصير لدينا 3^q نيوترون وإذا استغرقت كل خطوة 0.01 s فإنه بعد مرور ثانية واحدة ، يصير العدد الكلي للنيوترونات $3^{100} \approx 10^{48}$. ولما كانت 235 kg من اليورانيوم تحتوى على 6×10^{26} ذرة فحسب ، أصبح من الواضح أن تفاعلاً كهذا لابد أن يحدث بعنف متفجر .

هناك نواة أخرى مهمة قابلة للانشطار . بالإضافة إلى ^{235}U وهي نظير للبلوتونيوم أو $^{239}_{94}Pu$ وهو ينشطر بسهولة إذا قذف بنيوترون سريع ناتج من عملية الانشطار . وهكذا يمكن لتفاعل انشطارى متسلسل أن يستمر ذاتيًا داخل كتلة كبيرة بدرجة كافة من البلوتونيوم . والبلوتونيوم لا يتواجد كعنصر طبيعي ولابد من تصنيعه خلال ما يسمى **بتفاعل التوليد** ، حيث يتم تعريض ^{238}U لقذائف من النيوترونات فتحدث سلسلة من التفاعلات .



شكل 13-28:
يمكن للتفاعل المتسلسل أن يبدأ بنيوترون واحد .

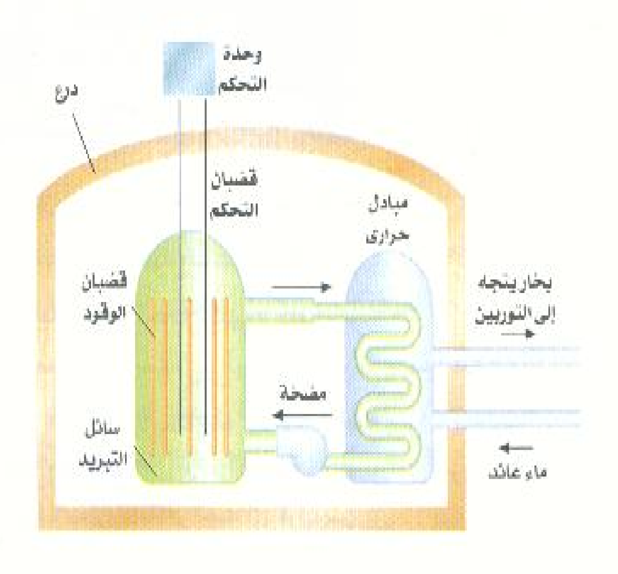
$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e$$

$$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}e.$$

وبالاختصار فإن ما يحدث هو تكوين ^{239}U عند امتصاص نيوترون ، وبدلاً من حدوث انشطار ، فإن هذه النواة تتحول عن طريق اضمحلال β إلى Np ، التي تضمحل بإطلاق جسيم β لتعطي Pu . وتتم عمليات اضمحلال β هذه بسرعة كبيرة بأعمار نصف تصل إلى 23.5 دقيقة و 2.35 يومًا على الترتيب . على أن ^{239}Pu مستقر نسبيًا ويضمحل بعمر نصف مقداره 24,400 سنة . وهكذا تتم ولادة نواة ^{239}Pu القابلة الانشطار من نواة ^{238}U غير القابلة للانشطار . والبلوتونيوم ^{239}Pu هو المادة المستعملة عمليًا في جميع أسلحة الانشطار النووي في العالم بأسره .

إن أساس عمل المفاعلات النووية هو التفاعل الانشطاري المتسلسل ، وإن كانت بعض الصعوبات قد تنشأ في التطبيقات العملية . ولكي نصل إلى تفاعل مستقر غير متفجر داخل المفاعل فلابد أن تسفر كل عملية انشطار عن عملية انشطار إضافية واحدة (وليست عمليتان حتى لا يتفجر التفاعل ، ولا أقل من عملية واحدة وإلا خمد التفاعل) . وللمحافظة على ما يكفي من النيوترونات في غرفة التفاعل ، فإن حجم المادة القابلة للانشطار ، لابد أن يكون من الكبر بحيث لا تتناثر نيوترونات أكثر من اللازم عبر سطحها وتفقد من التفاعل ، كما أن هناك **كتلة حرجة** بالنسبة للمادة القابلة للانشطار . فإذا كانت المادة المتاحة أقل من اللازم ، فلن تكون هنا نيوترونات كافية لإحداث تفاعل متسلسل مستمر ذاتيًا .

علاوة على ذلك ، فإن قدرة النيوترونات على أن تكون عرضة لأن تقتنص من جانب نواة ^{235}U ، تعتمد على سرعة هذه النيوترونات . فالنيوترونات البطيئة أكثر عرضة لأن تحدث انشطارًا عن النيوترونات السريعة . ولهذا السبب ، يتكون جزء كبير من حجم المفاعل النووي من المهدئ ، وهو عبارة عن مادة خاملة تستخدم في إبطاء النيوترونات التي تنبعث خلال عملية الانشطار . وحيث أن كتلة النيوترون هي 1 u ، لذا فإن ما يبطئ حركتها أحسن ما يمكن هو تصادمها مع جسيمات لها تقريبًا نفس الكتلة . والمادة المهدئة في المفاعلات تتكون عادة من مواد ذات وزن ذرى منخفض ، ومن الأمثلة الشائعة لها الكربون والماء ولدائن المواد الهيدروكربونية .

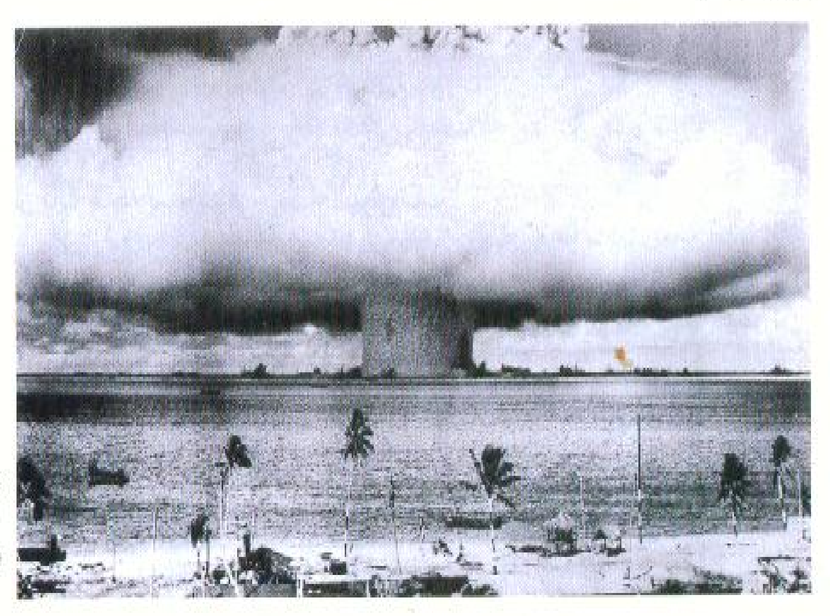


شكل 14-28:
رسم تخطيطي لمفاعل نووي انشطاري .

28-17 المفاعلات النووية

يؤدى المفاعل فى محطة للقوى النووية نفس الدور الذى يؤديه الفرن فى مولد بخارى فهو يعمل كمصدر حرارى شديد ، وتستخدم الحرارة فى توليد البخار الذى يدير بدوره توربينات نظام المولد الكهربى . ويوضح الشكل 14-28 رسمًا تخطيطيًا لمفاعل نموذجى .

يحتوى **قلب المفاعل** على المادة القابلة للانشطار وهى محفوظة داخل أنابيب ضيقة وطويلة من المعدن ومغلقة بإحكام ويطلق عليها **قضبان الوقود** . والوقود المستخدم فى المفاعلات التجارية فى الولايات المتحدة هو UO_2 ، حيث تتم زيادة النسبة المئوية للنظير ^{235}U من 0.7% الموجودة فى الطبيعة إلى نحو 3% خلال عملية تسمى **عملية إثراء** . وهى خطوة مهمة لتوفير عدد كاف من الأهداف القابلة للانشطار حتى يتم تشغيل كفء للمفاعل* . وتغمس القضبان فى الماء الذى يعمل كمهدئ وكمبرد فى نفس الوقت . فالماء - كمهدئ - يقوم بإبطاء النيوترونات الناتجة عن الانشطار مما يرفع - بالتالى - من الكفاءة التى تؤدى بها إلى انشطارات تالية . أما الحرارة النوعية الكبيرة للماء فتتيح له المحافظة على قضبان الوقود عند درجة حرارة التشغيل ، واستخراج الحرارة المتولدة فى القضبان لكى يسلمها إلى المبادل الحرارى حيث يتم إنتاج البخار .



نستطيع عن طريق اندماج الهيدروجين الحصول على طاقة على نطاق غير مسبوق ويصعب تصديقه .

يتم استخدام سلسلة من **قضبان التحكم** المصنوعة من البورون أو الكادميوم للمحافظة على معدل مستقر للانشطار وذلك لأنها قادرة على امتصاص النيوترونات ومن السهل إدخال هذه القضبان أو سحبها من قلب المفاعل . وكلما أدخلت لمسافة أكبر ، كلما زاد

* إن مطلب الحصول على يورانيوم صالح لعمل أسلحة نووية يتم فيها تفاعل تفجيرى غير محكوم ، يقتضى إثراء نحو 85 بالمائة من ^{235}U على الأقل . إن الفرق الهائل بين هذا التركيز لليورانيوم القابل للانشطار وذلك المستخدم فى المفاعلات السلمية هو أن الأخيرة لا يمكن أن ينفجر تحت أى ظرف من الظروف بقوة قنبلة نووية .

امتصاصها للنيوترونات وبهذا يقل عدد عمليات الانشطار التى تقوم بها . وإذا ما أدخلت القضبان إلى أقصى مدى لها فإن التفاعلات تتوقف تمامًا .

وإذا كانت قضبان الوقود هى التى تنتج القدرة ، فلابد أن تكون معرضة لحدوث تغيرات مهمة بداخلها ، حيث تتراكم شظايا الانشطار ذات النشاط الإشعاعى المرتفع . وتشع هذه المواد جسيمات β ذات الطاقة المرتفعة بمعدلات كبيرة بحيث أن 7% من الناتج الكلى للقدرة الحرارية يكون بسبب هذا النشاط الإشعاعى . وعند حدوث أى طارئ مثل خلل فى سريان المبرد فإن النسبة المتبقية وهى 93% من القدرة الناتجة يمكن إيقافها على الفور وذلك بإدخال قضبان التحكم إلى قلب المفاعل . على أنه لا توجد طريقة يمكن بها إيقاف النشاط الإشعاعى لشظايا الانشطار . وهذا المصدر كافٍ لصهر مجموعة قضبان الوقود والتسبب فى ارتفاع متزايد لدرجات الحرارة والضغط مما قد يدمر هيكل المفاعل . ولتجنب هذا التأثير ، فإن نظامًا منفصلاً لتبريد القلب يتم تشييده داخل المفاعل تحسبا للطوارئ . وللمفاعلات الموجودة فى الولايات المتحدة سجل ممتاز من حيث أمان التشغيل على مدى الأعوام الثلاثين الماضية .

ومن التغيرات المهمة الأخرى ، التى تحدث فى قضبان الوقود ، تراكم مادة البلوتونيوم نظرًا لقيام بعض النيوترونات السريعة بالتصادم مع نوى ^{238}U والتسبب فى حدوث تفاعلات مولدة . وتراكم البلوتونيوم هذا من النواتج الحتمية لتشغيل المفاعل ؛ حيث تتكون من 50 إلى 55 نواة ^{239}Pu عند حدوث مائة عملية انشطار فى ^{238}U .

يتطلب هذان النوعان من التغيرات فى قضبان الوقود أن تتم إزالتها طالما كان هناك قدر ملموس من ^{235}U غير المستنفد . وعندما أنشئت المفاعلات أول مرة ، فقد كان مخططًا أن يعاد تشغيل هذه القضبان المستهلكة . فاليورانيوم يمكن إعادة إصلاحه ، والبلوتونيوم يمكن فصله كيميائيًا ، أما شظايا الانشطار ذات النشاط الإشعاعى المرتفع فيتم التخلص منها بدفنها فى باطن الأرض بعد حفظها داخل أوعية محكمة الإغلاق . على أن إعادة التشغيل محفوفة بمخاطر كثيرة ـ كما اتضح فيما بعد ـ ولهذا هجرت . أما عمليات التخلص من النفايات فقد تم تطويرها ، ولكن لم نصل إلى حل مقبول سياسيًا ـ لسوء الحظ ـ يضمن تخلصًا دائمًا منها .

وخلافًا لليورانيوم فإن البلوتونيوم ليس بحاجة لعمليات الإثراء حتى يصير صالحًا للاستعمال فى الأسلحة النووية . كما أن حقيقة إمكانية فصل البلوتونيوم كيميائيًا من قضبان الوقود المستنفد ـ تتيح تراكم العديد من الكتل الحرجة للبلوتونيوم من نواتج تشغيل مفاعلات اليوارنيوم العادية . ولذلك فإن انتشار وتكاثر أسلحة البلوتونيوم يصبح ممكنًا تحت رداء الإنتاج السلمى للطاقة الكهربية من المفاعلات الانشطارية الحالية .

وتنتج المفاعلات المتخصصة النظائر المشعة المستخدمة فى التشخيص والعلاج الطبيين وكذلك فى العمليات الصناعية . وتتم صناعة الكثير من مصادر الإشعاع المستخدمة حاليًا فى المستشفيات والصناعة ومعامل البحوث ، وذلك بوضع المواد المناسبة داخل قلب المفاعل . وبالإضافة إلى ذلك ، تتواجد مفاعلات الأبحاث فى أجزاء كثيرة من

العالم . ويتم فى تلك المفاعلات مد « أنابيب » تنقل الإشعاع الشديد من قلبها إلى خارج المفاعل لتستخدم كحزم قوية من الإشعاع . وهكذا نرى أن للعمليات الانشطارية إمكانية هائلة كما أن لها مخاطر ضخمة للبشرية .

مثال 28-6:

يقوم مفاعل انشطارى نموذجى بتحويل ثلث الحرارة الناتجة من عمليات الانشطار إلى قدرة كهربائية مقدارها 1000 MW . ما عدد عمليات انشطار ^{235}U فى الثانية تلزم لحدوث هذا التحويل ؟ وما هى كتلة ^{235}U التى سيستهلكها المفاعل فى عمليات الانشطار خلال عام من التشغيل ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما مقدار الحرارة التى لابد من انطلاقها من الانشطار لكى تنتج 1000 MW ؟

الإجابة : حيث أن كفاءة التحويل تساوى 1/3 ، لذا فإن إنتاج 1000 MW يتطلب إنتاج 3000 MW من عمليات الانشطار .

سؤال : ما مقدار الطاقة المنطلقة فى كل عملية انشطار ؟

الإجابة : نحو 200 MeV فى المتوسط .

سؤال : ما هى العلاقة بين عدد عمليات الانشطار وكتلة اليورانيوم ^{235}U المستخدمة ؟

الإجابة : يحتوى كل 235 g من ^{235}U على 6.02×10^{23} نواة .

الحل والمناقشة : أولاً نحول 3000 MW إلى MeV/s :

$$3000\ \text{MW} = \frac{3000 \times 10^{6}\ \text{J/s}}{1.6 \times 10^{-13}\ \text{J/MeV}}$$

$$= 1.88 \times 10^{22}\ \text{MeV/s}$$

وإذا كانت الطاقة المناظرة لكل عملية انشطار هى 200 MeV فإن عدد تلك العمليات هو

$$\frac{1.88 \times 10^{22}\ \text{MeV/s}}{200\ \text{MeV/fission}} = 9.4 \times 10^{19}\ \text{fission/s}$$

وعدد المولات التى تنشطر فى الثانية هو

$$\frac{9.4 \times 10^{19}\ /\text{s}}{6.02 \times 10^{23}} = 1.56 \times 10^{-4}\ \text{mol/s}$$

ويصل هذا المقدار فى سنة إلى :

$$(1.56 \times 10^{-4}\ \text{mol/s})(3.16 \times 10^{7}\ \text{s/yr}) = 4930\ \text{mol/yr}$$

وعلى ذلك يتطلب تشغيل المفاعل لمدة عام كامل :

$$(4930\ \text{mol/yr})(0.235\ \text{kg/mol}) = 1.16 \times 10^{3}\ \text{kg/yr}$$

وهذه الكمية أكبر قليلاً من طن مترى (1000 kg) . وحيث أن كمية اليورانيوم ^{235}U هى

3% فقط من كتلة الوقود ، لذلك يستهلك المفاعل ما مجموعه نحو 35 طنًا متريًا من UO_2 المخصب كل سنة .

28-18 الاندماج النووى

إذا رجعنا إلى الشكل 3-28 لوجدنا أن النوى ذا العدد الذرى المنخفض كالليثيوم له طاقة ربط لكل نوية أصغر حتى مما لدى اليورانيوم . ومعنى هذا أن النويات فى النوى الذى عدده الذرى منخفض سيكون لديها كتلة لكل نوية أكبر مما لدى تلك التى فى النوى الذى عدده الذرى أكبر . أى أننا نستطيع تخيل ضم نوى صغير معًا لتكوين نوى أكبر ، وخلال ذلك ، نحول الكتلة إلى طاقة . وهذا النوع من التفاعل الذى يتم فيه ضم النوى الصغير معًا لتكوين نوى أكبر هو ما يسمى **الاندماج النووى** . ولكى نتصور الطاقات الهائلة التى تنطلق فى التفاعلات الاندماجية هيا ننظر فى مجموعة التفاعلات التى تؤدى إلى تولد جانب كبير من طاقة الشمس .

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + ^{0}_{+1}e + ^{0}_{0}\nu$$

حيث $^{0}_{+1}e$ إلكترون موجب (يسمى بوزيترون) و $^{0}_{0}\nu$ نيوترينو . ثم يتفاعل الديوتيريوم $^{2}_{1}H$ بعد ذلك :

$$^{2}_{1}H + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He$$

ثم :

$$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + 2\,^{1}_{1}H$$

وكما ترى فإن ما حدث بالفعل هو اندماج أربعة بروتونات معًا لتكون نواة هليوم 4 .

ولكى نجد مقدار الطاقة المنطلقة فى هذه العملية ، علينا أن نجد الفقد فى الكتلة . إن كتلة البداية هى الخاصة بالبروتونات الأربعة $4 \times 1.007276 = 4.029104$ u ، بينما الكتلة النهائية هى الخاصة بنواة الهليوم 4 ؛ $4.002604 - 2\,m_e = 4.001506$ u . وهذا يبين أن الفقد فى الكتلة هو 0.0276 u ، والطاقة المكافئة لهذه الكتلة هى :

$$(0.0276 \text{ u})(931 \text{ MeV/u}) = 25.7 \text{ MeV}$$

ولكن 1 kg من الهليوم به $N_A/4$ ذرة ولذلك تكون الطاقة المفقودة فى تكوين 1 kg من الهليوم هى :

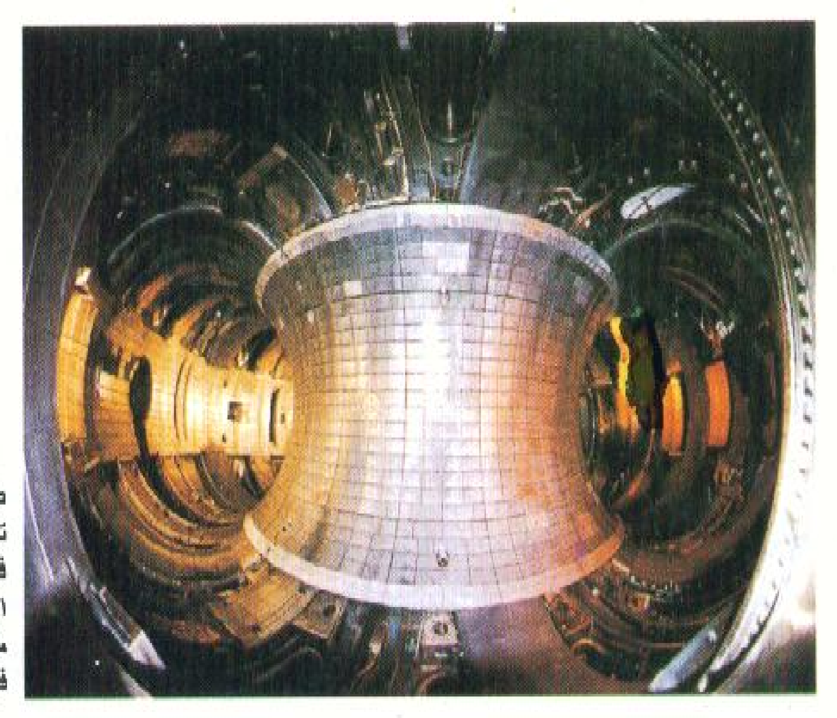
$$\text{الطاقة} = \frac{1}{4}(6 \times 10^{26})(25.7 \text{ MeV}) = 3.86 \times 10^{33} \text{ eV} = 6.2 \times 10^{14} \text{ J}$$

ومن المثير للاهتمام مقارنة هذا المقدار من الطاقة ، بالطاقة المكافئة للكتلة الكلية الموجودة فى 1 kg من المادة : $E = mc^2 = 9 \times 10^{16}$ J ؛ أى أن الطاقة التى تنطلق بالاندماج ليست سوى 0.7% من هذا المقدار ، ولذلك يمكننا القول بأن نحو 0.7% من المادة هو

الذى يتحول إلى طاقة فى اندماج الـهيدروجين . وبحساب مماثل لانشطار 1 kg من ^{235}U نجد أنه ينتج طاقة مقدارها 8×10^{13} J وهو ما يناظر تحويل 0.1% من الكتلة إلى طاقة . وفى مقابل هذا فإن الاحتراق الكيميائى يعطى نحو 3.3×10^{7} J/kg فحسب من الوقود والأكسجين . أى أن التفاعلات الكيميائية لا تطلق سوى 10^{-7} من الطاقة - لكل كيلو جرام - التى تطلقها تفاعلات الاندماج والانشطار .

وعلى الرغم من أن مصدر الطاقة فى الشمس والنجوم هو عمليات الاندماج ، فإن التفاعل الاندماجى لم يمكن جعله مصدرًا عمليًا ومستقرًا للطاقة على الأرض حتى الآن . والاندماج - من حيث المبدأ - مصدر جذاب للغاية للطاقة ، فنواتجه وهو ^{4}He لا تشكل نفايات مشعة ولكنه عنصر نادر ومفيد جدًا . أما الوقود فهو موجود بوفرة لأن الـهيدروجين من مكونات الماء . . وإذا دمجنا هذه الإمكانيات المتاحة مع كميات الطاقة الـهائلة التى ينتجها الكيلو جرام لوجدنا أن لدينا مصدرًا لا ينضب للطاقة تقريبًا .

وتتركز صعوبة الحصول على تفاعل اندماجى مستقر فى أن التفاعل الاندماجى لا يمكن أن يحدث إلا إذا جعلت البروتونات على مسافة مساوية لمدى القوى النووية الشديدة وهى نحو 5×10^{-15} m ؛ وعند مثل هذه المسافة تصبح قوى كولوم التنافرية هائلة جدًا . وبعبارة أخرى فإن طاقة الوضع الكهربية عند هذه المسافات ، كبيرة جدًا ومن رتبة 1 MeV ، وهى مقاربة لطاقة الحركة التى يجب إعطاؤها للبروتونات حتى تندمج قبل أن تتنافر بواسطة قوة كولوم . ومن السهل الحصول على هذه الطاقة بواسطة المعجلات الضخمة للجسيمات . إلا أن كفاءة تلك الآلات لا زالت أقل من أن تجعل هذه التفاعلات عملية . وعلينا أن نستغل التصادمات **الحرارية** بين البروتونات فى الغاز الحار للغاية . وسنحاول أن نعرف ما هى درجات الحرارة التى قد تلزم لإتمام الاندماج بهذه الطريقة .



صورة لباطن مفاعل الاندماج المسمى توكماك . ويستخدم الفيزيائيون هذا الجهاز فى دراسة الخواص المميزة لتفاعلات الاندماج المحددة مغناطيسيًا ، بهدف تطوير مفاعل اندماجى على نطاق تجارى عملى فى المستقبل .

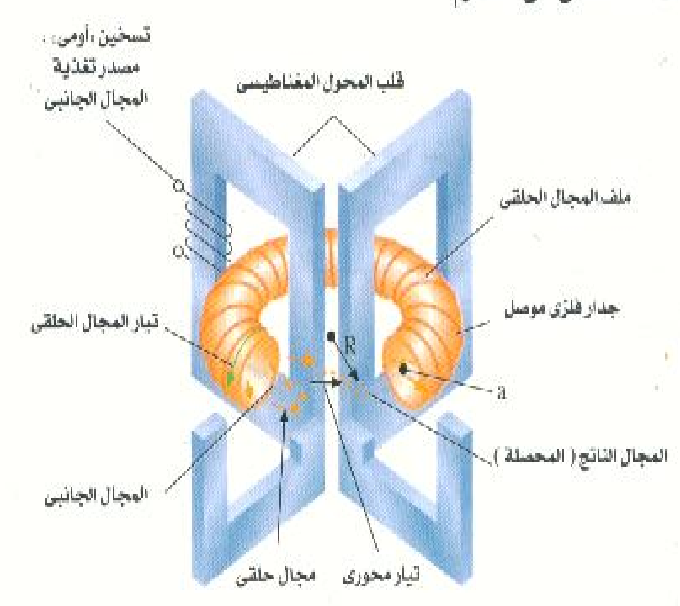
نعلم من نظرية الحركة للغازات أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجسيم ما فى غاز درجة حرارته T هو $\frac{3}{2}kT$. فإذا ساوينا هذه الطاقة بالمقدار 1 MeV أو 1.6×10^{-13} J لوجدنا :

$$\frac{3}{2}(1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K})T = 1.6 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

ومن ثم :

$$T = 7.6 \times 10^{9}\ \text{K}$$

إن مطلب درجات الحرارة المرتفعة جدًا هو السبب فى تسمية هذا التفاعل **بالاندماج النووى الحرارى** . وطاقات الجسيم موزعة - بطبيعة الحال على مدى كبير من القيم حول هذا المتوسط . وعندما تكون قيم الكثافة فى قلب الشمس وهى نحو 150×10^{3} kg/m^3 متاحة ، فإن مقادير ضخمة من طاقة الاندماج يتم إنتاجها عند درجة حرارة مقدارها 15 مليون درجة بواسطة جسيمات تقع عند الطرف المناظر للطاقات العالية فى التوزيع الحرارى . والقدرة المشاهدة الناتجة عن الشمس بسبب الاندماج النووى هى 4×10^{26} watt ويتطلب هذا أن يندمج نحو 655 مليون طن من الهيدروجين (البروتونات) لتكوين 650 مليون طن من ^{4}He كل ثانية فى قلب الشمس . والشمس قادرة على احتواء هذا التفاعل الذى يتم عند درجة حرارة مرتفعة وذلك لشدة جاذبيتها أى أن الجاذبية (التثاقل) هى التى توفر احتواءً مستقرًا للتفاعل الاندماجى فى النجوم .



شكل 15-28:
نظام توكماك الاندماجى ، ذو الحصار المغناطيسى ، حيث يقوم مجال مغناطيسى مركب بحصر الغاز عند درجات حرارة مرتفعة (بلازما) داخل منطقة على هيئة الدونت (أنبوبة حلقية) .

أما على الأرض ، فعلينا أن نبحث عن وسائل أخرى لاحتواء مثل هذا التفاعل شديد الحرارة . إننا قادرون على إنتاج اندماج بشكل **تفجيرى** ، كما يحدث مع القنابل الهيدروجينية ، ولكننا لم ننجح حتى الآن فى تنفيذ تفاعل نووى حرارى **محكوم** . وتنطوى محاولات الاحتواء لدينا على حقيقة مهمة وهى أن المادة تصبح مؤينة بدرجة كبيرة ، فتتكون من ثم من أيونات وإلكترونات منفصلة عن بعضها البعض فى حالة تسمى **بلازما** . ويمكن حصر الجسيمات المشحونة بواسطة مجالات مغناطيسية قوية ، وإن كانت درجات الحرارة المرتفعة والضغوط الهائلة سرعات ما تؤدى إلى حالات من

عدم الاستقرار التى تهدم الاحتواء . ولم يزد ما تم تطويره عبر السنين من البحوث فى العديد من البلدان ، عن محاولة لتسخين البلازما بسرعة كبيرة واحتوائها فى مجالات مغناطيسية لفترة طويلة بحيث أن ما ينتج من طاقة يفوق ما يستهلك منها قبل أن يتمزق الاحتواء . ويعتبر جهاز « توكاماك » من أكثر المحاولات الواعدة ، ويوضحه تخطيطيًا الشكل 15-28 ، وتقترب أزمنة الاحتواء من 1 s ومن المتوقع الوصول إلى نقطة التعادلية فى الطاقة (عندما تتساوى الطاقة الناتجة عن الاندماج مع ما يمد به جهاز التوكاماك من طاقة) مع زيادة حجم التوكاماك .

ويركز الباحثون حاليًا على تفاعلين اندماجيين يتمان عند درجات حرارة أقل من التى يحدث عندها تفاعل البروتون - بروتون . فتفاعل الديوتيريوم - تريتيوم (^2H - ^3H) الاندماجى يحتاج « فقط » إلى 4×10^7 K ، أما تفاعل الديوتيريوم - ديوتيريوم (^2H - ^2H) الاندماجى فيحدث عند 10^8 K . ويتم حاليًا أيضًا تجربة عدد من طرق التسخين وتم بالفعل الوصول إلى درجات حرارة قريبة من هذه . وتشير النتائج الحالية والتى ظهرت فى الولايات المتحدة وبريطانيا إلى أن الاستغلال التجارى للتفاعل الاندماجى قد يصبح مجديًا فى غضون من 25 إلى 50 عامًا .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) النوية ، (ب) وحدة الكتل الذرية ، (جـ) العدد الذرى وعدد الكتلة ، (د) النظير ، (هـ) الوفرة الطبيعية ، (و) طاقة الربط النووية ، (ز) اضمحلال النشاط الإشعاعى ، (ح) الفاعلية ، (ط) ثابت الاضمحلال ، (ى) عمر النصف ، (ك) اضمحلال ألفا α واضمحلال بيتا β ، (ل) نسبة التفرع ، (م) الجرعة ، (ن) الجرعة المكافئة حيويًا ، (س) وحدات البيكريل ، والكورى ، والجراى ، والسيفرت ، (ع) الانشطار النووى ، (ف) الاندماج النووى ، (ص) التفاعل المتسلسل ، (ق) قضبان الوقود ، (ر) قضبان التحكم ، (ش) المهدئ ، (ت) شظية الانشطار ، (ث) تفاعل التوليد ، (خ) نسبة التوليد .

2 أن تقدر حجم نواة ما إذا عرفت عدد الكتلة لها .

3 أن ترسم بيانيًا العلاقة بين طاقة الربط لكل نوية وعدد الكتلة A .

4 أن تحسب طاقة ربط النواة إذا عرفت كتلتها .

5 أن ترسم بيانيًا العلاقة بين N و t بالنسبة لمادة ذات نشاط إشعاعى وإذا علمت عمر النصف أو ثابت الاضمحلال لمادة ما فى العينة ، أن تحسب كسر العينة الأصلية الذى تبقى بعد فترة زمنية معينة .

6 أن تكتب معادلة التفاعل النووى بالنسبة لنواة معينة يحدث لها اضمحلال α واضمحلال β . وإذا علمت كتل النوى الابتدائى والنهائى أن تعين أيها سيتم تلقائيًا (إذا تم فى الأصل) .

7 أن تعد رسمًا بيانيًا مثل الذى فى الشكل 8-28 لسلسلة إذا علمت النواة الابتدائية والجسيمات المنبعثة منها .

8 أن تقارن بين المدى والآثار التأيينية لإشعاعات α ، β ، γ عند اختراقها للمادة .

9 أن تفسر - بالرجوع إلى الرسم البيانى الخاص بطاقة الربط النووية - السبب فى أن التفاعل الانشطارى لليورانيوم لابد وأن يطلق طاقة . وأن تذكر ما المقصود بتفاعل انشطارى متسلسل وتربط هذا بسبب اختيار ^{235}U لتصنيع القنبلة .

10 أن ترسم تخطيطيًا مفاعلاً انشطاريًا مبينًا قضبان الوقود ، وقضبان التحكم والمهدئ والمبادل الحرارى والتوربين مع شرح وظيفة كل منها . أن تشرح أهمية إثراء الوقود .

11 أن تشرح تفاعل التوليد الذى يصنع من خلاله البلوتونيوم من اليورانيوم ، وتشرح كيف يختلف انشطار البلوتونيوم عن انشطار ^{235}U

12 أن تشرح مصدر الطاقة الحرارية التى تبقى فى المفاعل الانشطارى حتى بعد إنهاء التفاعلات الانشطارية بواسطة قضبان التحكم . أن تشرح خطورة هذه الحرارة .

13 أن تفسر ، بالرجوع إلى الرسم البيانى لطاقة الربط النووية ، السبب فى أن الاندماج النووى للهيدروجين لابد أن يتسبب فى إطلاق طاقة . وأن تذكر سبب صعوبة تنفيذ الاندماج فى المعمل مقارنًا بالانشطار . أن تذكر بعض الفوائد الممكنة للاندماج كمصدر للطاقة إذا قورن بالانشطار .

ملخص

كميات مشتقة وثوابت فيزيائية

وحدة الكتل الذرية (u)

$1\ u = \frac{1}{12}$ من كتلة ذرة الكربون $^{12}C = 1.660566 \times 10^{-27}\ kg$

الفاعلية

1 becquerel (Bq) = 1 decay/s ، 1 curie (Ci) = 3.7×10^{10} Bq

الجرعة الممتصة

1 gray (Gy) = 1 J/kg ، 1 rad = 0.010 Gy

الجرعة المكافئة بيولوجيًا (حيويًا)

1 sievert (Sv) = 1 Gy × RBE ، حيث RBE هى الفاعلية الحيوية النسبية لنوع الإشعاع الممتص . 1 rem = 0.010 Sv

تعريفات ومبادئ أساسية :

الرموز الخاصة بالنظائر

بالنسبة لنواة معينة فإن ،

Z = عدد البروتونات (العدد الذرى) ؛ N = عدد النيوترونات ، $A = Z + N$ = عدد النويات (عدد الكتلة) .

خلاصة :

1 ينتمى كل النوى الذى له نفس العدد الذرى Z إلى نفس العنصر الكيميائى .

2 يعتبر النوى الذى له نفس Z وله N مختلفة (ومن ثم A مختلفة) من نظائر العنصر الكيميائى .

3 يرمز لنظير عنصر ما X بالرمز $^{A}_{Z}X$.

4 العناصر الموجودة فى الطبيعة هى خليط من نظائر متعددة . والوفرة النظائرية الطبيعية هى النسبة المئوية لمختلف النظائر التى تكون العنصر .

الحجم والكثافة النوويين

نصف قطر نواة عدد كتلتها A هو بالتقريب : $R = (1.2 \times 10^{-15}\ m)\, A^{1/3}$.

خلاصة :

يقتضى اعتماد R على A أن يتناسب الحجم النووى مع A ، ومن ثم يكون لجميع النوى نفس كثافة الكتلة تقريبًا .

قوة وطاقة الربط النووى

لقوة الربط النووى الخصائص المميزة التالية :

1 لـها مدى قصير للغاية ، وتصبح صفرًا إذا زادت المسافة بين النويات عن نحو 5×10^{-15} m .

2 قوية للغاية وهى قادرة فى مدى تأثيرها أن تمسك بالنيوترونات معًا ، متغلبة بذلك على التنافر القوى جدًا بين شحنات البروتونات .

3 تنطبق بنفس القدر على البروتونات والنيوترونات ولا تأثير لـها مطلقا على الإلكترونات ، ولذلك لا وجود للإلكترونات داخل النواة .

وطاقة ربط النواة هى الطاقة اللازمة لفصل النواة إلى مكوناتها من البروتونـات والنيوترونـات . فـإذا كـان الفرق بـين الكتلـة الكلية للنويات المنفصلة وكتلة النواة مجتمعة هو النقص الكتلى Δm ، فإن طاقة الربط تكون ،

طاقة الربط $= \Delta mc^2$

النشاط الإشعاعى

هو العملية التى تتخلص فيها النواة غير المستقرة من الطاقة الزائدة بإطلاق جسيمات وإشعـاع كهرومغناطيسى . ومـن الإشعـاع المألوف ، جسيمات α (نوى ^{4}He) وجسيمات β (إلكترونات) ، وأشعة جاما γ .

عمر النصف ($T_{1/2}$)

تضمحل المادة المشعة أسيًا ، وهو ما يتميز إحصائيًا بفترة زمنية تمر خلالـها نصف كمية المادة التى وجـدت فـى البدايـة بتغير إشعاعى . وهذه الفترة الزمنية التى تتباين فى مدى واسع من نظير إلى آخر ، هى ما يسمى عمر النصف للنظير .

ثابت الاضمحلال (λ)

هناك وصف بديل للاضمحلال الإشعاعى ، يعطى بالمعادلة التحليلية التالية : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$.

حيث N_0 هو العدد الأصلى للنوى فى العينة ، و $N(t)$ هو العدد المتبقى عبر الزمن t و λ هو ثابت الاضمحلال للنظير . ويرتبط λ بعمر النصف بالمعادلة :

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

فاعلية عينة ما

هى معدل حدوث اضمحلالات إشعاعية لعينة ما ، أى عدد الاضمحلالات فى الثانية .

الفاعلية $= \lambda N(t)$

التفاعلات النووية

عندما تدخل النوى فى تفاعل يغير من تركيبها ، فإن تلك التغيرات لابد أن تتبع قوانين الفيزياء للبقاء :

1 يجب أن تظل الشحنة الكلية على جميع الجسيمات قبل وبعد التفاعل ثابتة .

2 يجب أن يظل العدد الكلى للنويات قبل وبعد التفاعل ثابتًا .

3 يستوجب بقاء الطاقة أن يكون الفرق فى الكتل الكلية قبل وبعد التفاعل مرتبطا بالطاقة التى امتصت أو أطلقت بالعلاقة :

الطاقة الممتصة أو المنطلقة $= \Delta m\, c^2$

خلاصة

1 إذا كانت $\Delta m < 0$ فإن طاقة تنطلق ، والنوى الناتج من التفاعل ستكون طاقته أقل واستقراره أكبر . ويمكن لـهذا التفاعل أن

يتم تلقائيًا ، تمامًا كما يحدث فى النشاط الإشعاعى .

2 أما إذا كانت $\Delta m > 0$ فإن الطاقة يجب أن تتوفر حتى يتم التفاعل . وهذا النوع من التفاعل لا يمكن أن يحدث تلقائيًا .

الانشطار النووى

تنشطر النواة فى هذه العملية إلى شظيتين رئيستين لهما حجم واحد تقريبًا مع إطلاق قدر من الطاقة . ويتحول نحو 1% من الكتلة الأصلية إلى طاقة فى عملية الانشطار . وهناك عدد قليل من النظائر الثقيلة التى لديها احتمال ملموس للانشطار عندما يتم قصفها بالنيوترونات . ومن أبرز تلك النظائر $^{235}_{94}U$ و $^{239}_{94}Pu$. وعند حدوث الانشطار ينطلق نيوترونان أو أكثر وهذا يتيح معامل مضاعفة النيوترونات الجاهزة لبدء عمليات انشطار جديدة ، وبذلك يحدث تفاعل متسلسل ، مما يجعل معدل الانشطار فى نمو أسّى .

الاندماج النووى

يمكن تحت ظروف معينة دمج أو صهر النوى الخفيف معًا ليتكون نوى أثقل ، ويصحب ذلك انطلاق الطاقة . وهذه العملية تسمى اندماجًا نوويًا . وعادة ما يتحول نحو 8% تقريبًا من الكتلة الأصلية إلى طاقة فى هذه العملية .

أسئلة وتخمينات

1 يستخدم الكوبالت 60 على نطاق واسع كمصدر لأشعة جاما المستخدمة فى العلاج الإشعاعى للسرطان . ما هو عدد البروتونات والنيوترونات والإلكترونات التى تحتويها ذرة $^{60}_{27}Co$ واحدة ؟

2 لماذا يعتبر الكيميائيون أن النظائر تمثل نفس العنصر حتى ولو لم تكن أنويتها هى نفسها ؟

3 هل للأطياف البصرية لكل من ذرات ^{235}U و ^{238}U أن تبدى اختلافًا بأى شكل جوهرى ؟

4 قدر الكتلة الذرية للنظير $^{64}_{30}Z$ إذا علمت أن طاقة الربط للنوية نحو 8.7 MeV .

5 التريتيوم هو النظير ^{3}H للهيدروجين وكتلته الذرية هى 3.016 u بينما تبلغ الكتلة الذرية للهيدروجين ^{1}H 1.0078 u وللنيوترون 1.00867 u . ما الذى تتوقعه بالنسبة لاستقرار التريتيوم ؟ كرر السؤال بالنسبة للنظير ^{2}H الذى تبلغ كتلته الذرية 2.0141 u .

6 يضمحل فلز ما إلى عنصر مستقر وذلك بإطلاق جسيمات ألفا التى تبلغ طاقاتها نحو 9 MeV . وقد ثبتت كرة صغيرة من الفلز النقى عند طرف دبوس . صف الطريقة التى يمكنك بها معرفة عمر النصف للفلز إذا كان ذلك العمر نحو (أ) خمسة أيام و (ب) 2000 سنة .

7 تم امتصاص حزمة من جسيمات ألفا فى كتلة من الرصاص . ماذا يحدث لتلك الجسيمات ؟ لقد أثبت رذرفورد طبيعة جسيمات α عندما قام بتسخين الرصاص المشع .

8 يعتبر غاز الرادون المشع من الملوثات الخطيرة للهواء . وحيث أن الرادون يتسرب إلى داخل المنازل من الأرض تحتها ، فما هى العوامل المؤدية إلى مستويات الرادون الخطيرة ؟

9 ما هو مصدر غاز الهليوم على وجه الأرض ؟

10 من الممكن لقطعة من اليورانيوم 235 أصغر من الكتلة الحرجة أن تنفجر إذا وضعت داخل وعاء كبير مملوء بالماء . فسر السبب . ولماذا لا ينفجر ^{235}U إذا كان على هيئة سلك ، حتى لو كانت كتلة السلك أكبر من الكتلة الحرجة ؟

11 يشعر معظم أطباء الإشعاع أن النساء اللاتى تخطين سن الإنجاب ، بإمكانهن التعرض بأمان لكمية من أشعة إكس أكثر من التى تتعرض النساء الصغيرات لها . فكيف يمكنهم تبرير هذا الرأى ؟

12 قد يحدث أن شخصًا يعمل فى مجال أشعة إكس أن يحرق يده بدرجة كبيرة ويصبح لزامًا عليه أن تبتر تلك اليد ، ثم لا يعانى بعد ذلك من أية آثار جانبية . ومع ذلك ، فإن التعرض لجرعة زائدة من أشعة إكس التى قد لا تسبب أضرار محسوسة لجسده ولكنها قادرة على تشويه من ينجبهم من الأطفال بشكل خطير . اشرح السبب .

مسائل

الأقسام من 1–28 إلى 3–28

1 أوجد الكميات الآتية للنواة $^{14}_{7}N$: (أ) الشحنة النووية ، (ب) عدد النيترونات ، (جـ) نصف قطرها بالتقريب ، (د) الكثافة النووية .

2 أوجد الخواص التالية للنواة $^{202}_{80}Hg$: (أ) عدد البروتونات ، (ب) عدد النيوترونات ، (جـ) نصف قطرها بالتقريب ، (د) الكثافة النوية .

3 لنظير نووى معين عدد كتلة مقداره 43 ، وعدد نيوتروناته أزيد بثلاثة عن عدد البروتونات . حدد ما هو النظير .

4 لنظير معين 10 نيوترونات وعدد الكتلة الذرى له 18 . فأى نظير هو ؟

5 ما هى النواة المستقرة التى يبلغ نصف قطرها التقريبى نصف $(\frac{1}{2})$ نصف قطر النواة $^{216}_{84}Po$ ؟

6 قارن بين أنصاف الأقطار النووية والكثافات النووية لكل من النويدات الآتية : $^{7}_{3}Li$ ، $^{93}_{41}Nb$ ، $^{220}_{86}Rn$.

7 تعتبر الأرض كرة تقريبًا ، نصف قطرها 6.4×10^{6} m ، ومتوسط كثافتها 5520 kg/m³ . لو تخيلت أن الأرض انكمشت فصارت كرة لها نفس كثافة النواة ($\approx 2 \times 10^{17}$ kg/m³) ، فكم سيكون نصف قطرها عندئذ ؟

8 لقد تم تقدير كتلة الكون المشاهد على أنها من الرتبة 10^{51} kg . وإذا افترضنا أن هذه الكتلة ضغطت فى كرة لها كثافة النواة ($\approx 2 \times 10^{17}$ kg/m³) . فكم سيكون نصف قطر تلك الكرة ؟ قارن هذا مع نصف قطر الشمس 7×10^{8} m .

9 يستخدم منتقى السرعات فى جهاز مطياف الكتلة (الفصل التاسع عشر) للحصول على حزمة من الأيونات التى سرعتها 2.9×10^{5} m/s . أوجد نصف قطر المسار الذى يتبعه أيون ^{12}C أحادى التأين عندما تكون شدة المجال المغناطيسى B داخل المطياف $0.080\ T$.

10 ما هو الفرق بين نصفى قطر مسارى النظيرين ^{12}C و ^{14}C فى مطياف الكتلة الوارد فى المسألة رقم 9 ؟

11 يستخدم فى مطياف كتلة معين (الفصل التاسع عشر) فرق جهد مقداره 1700 V لتعجيل الأيونات ، ثم يتم حرفها فى مجال مغناطيسى شدته $0.070\ T$. تتبع حزمة من أيونات أحادية التأين مسارًا نصف قطره 12.0 cm فى المطياف . ما هى كتلة هذه الأيونات بالكيلو جرام وبوحدات الكتل الذرية ؟

12 فحصت حزمة من خليط أيونات أحادية التأين لنظيرين فى مطياف كتلة ، فوجد أن نصفى قطر المسارين الدائريين اللذين تتبعهما الأيونات هما 12.0 cm و 14.0 cm ، على الترتيب . أوجد النسبة بين الكتلتين الذريتين للنظيرين .

13 بلغ نصف قطر المسار الذى يتبعه أيون ^{12}C أحادى التأين 10.0 cm فى مطياف الكتلة . كم يكون نصف القطر لأيون الأكسجين ^{16}O ؟ (افترض أن شحنتى الأيونين وجهدى التعجيل متشابهة) .

14 يحتوى عنصر الكلور الموجود فى الطبيعة على نظيرين فقط . يكوّن أحد النظيرين $^{35}_{17}Cl$ نحو 75.5% ويكون الثانى $^{37}_{17}Cl$ نحو 24.5% . أوجد الكتلة الذرية لعينة طبيعية من الكلور إلى ثلاثة أرقام معنوية .

15 يتواجد البوتاسيوم الطبيعى كخليط من نظيرين : أحدهما ذو كتلة ذرية 38.964 u ووفرته النسبة 93.3% ، أما الثانى فكتلته الذرية 40.975 u ويمثل 6.7% . احسب الكتلة الذرية لعينة طبيعية من البوتاسيوم .

16 لقد وجد أن النيون متواجد في الطبيعة على هيئة نظائر ثلاثة . فالنظير ^{20}Ne وفرته النسبية 90.9% ، والنظير ^{21}Ne وفرته النسبية 0.3% أما النظير ^{22}Ne فوفرته النسبية 8.8% . قدر الكتلة الذرية للنيون كما وردت في الجدول الدوري للعناصر .

■ 17 يتكون اليورانيوم الموجود على الأرض من نظيرين أساسيين هما ^{235}U و ^{238}U . وتبلغ الكتلتان الذريتان لهما 235.044 u و 238.051 u على الترتيب ، في حين أن كتلة العينة الطبيعية هي 238.030 u . أوجد النسبة المئوية التقريبية لكل نظير في عينة طبيعية من اليورانيوم .

■ 18 للكربون الطبيعي نظيران أساسيان هما ^{12}C ؛ كتلته الذرية 12.00000 u ووفرته النسبية 98.892 u . ما هي الكتلة الذرية للنظير الآخر إذا كانت كتلة الكربون الطبيعي هي 12.01115 u ؟

القسم 4–28

19 استعن بالبيانات الموضحة في الشكل 3–28 لتعرف مقدار ما يفقد من الكتلة عند تكوين نواة الزنك 64 من بروتونات ونيوترونات حرة ، ما هي النسبة المئوية لفقد الكتلة ؟

20 احسب من بيانات الشكل 3–28 مقدار الطاقة المطلوب لتمزيق نواة الزئبق 202 إلى بروتونات ونيوترونات حرة . ما هو المكافئ الكتلي (بوحدات u) لهذه الطاقة ؟

21 احسب طاقة الربط الكلية لنواة الكربون 12 ؛ ما مقدار طاقة الربط لكل نوية ؟ **تلميح** : تذكر أن كتلة ذرة الكربون 12 هي 12 u تمامًا .

22 احسب طاقة الربط الكلية وطاقة الربط لكل نوية لنواة ^{40}Ca . والكتلة الذرية لهذه النواة هي 39.96259 u .

23 الكتلة الذرية لنواة ^{14}N هي 14.00307 u ، ولنواة ^{15}N ، 15.00011 u . مستخدمًا هذه البيانات ، احسب طاقة الربط للنيوترون الزائد في نواة ^{16}N .

24 استخدم بيانات 3–28 ، وقيم كتلتي البروتون والنيوترون لإيجاد كتلة ذرة كريبتون 84 .

25 إذا كان لنظيرين نفس عدد الكتلة مع اختلاف عدديهما الذريين ، فإنهما يسميان **أيزوبـاران** . احسب الفرق في طاقة الربط لكل نوية بالنسبة لكل من الأيزوبارين $^{36}_{16}$S و $^{36}_{18}$A . كيف تفسر اختلاف قيمتي طاقة الربط ؟

■ 26 ما مقدار الطاقة اللازم لإزالة نيوترون من نواة النظير ^{13}C ؟ وما هو النظير الذي ينتج بعد هذه الإزالة ؟

القسمان 5–28 و 6–28

27 سجل عداد جايجر مثبت فوق عينة مشعة 678 عدَّة في الدقيقة . فكم عدَّة سيسجلها بعد انقضاء أربعة أعمار نصف لهذه المادة .

28 سجلت عينة مشعة 840 عدَّة في الدقيقة في لحظة ما ؛ وبعد مرور 48 h سجلت 44 عدَّة في الدقيقة . ما هو عمر النصف لهذه العينة ؟

29 تحتوي مادة مشعة على 4.5×10^{12} نواة ؛ عمر النصف لها 0.84 yr . (أ) ما هو ثابت اضمحلال هذه المادة ؟ (ب) كم عدد النوى الذي يضمحل في العينة الأصلية في دقيقتين ؟

30 عمر نصف البولونيوم 140 d . كم تستغرق عينة من البولونيوم لكي تضمحل إلى ثمن $(\frac{1}{8})$ الكمية الأصلية ؟

31 تحتوي كبسولة صغيرة من غاز الرادون على 8.0×10^{12} ذرة . وعمر النصف للرادون 3.8 d . ما عدد التفتتات التي تحدث في الكبسولة كل دقيقة ؟

32 بعض الساعات تنير أرقامها في الظلام ، وذلك لأن تلك الأرقام تطلى أحيانًا بدهان به مادة مشعة . وقد سجل طالب باستخدام عداد جايجر أن 750 تفتت يحدث في الثانية . فإذا كانت أرقام الطالب صحيحة . ما عدد وحدات الكوري من النشاط الإشعاعي توجد في أرقام الساعة ؟

33 يسجل عداد جايجر مثبت فوق قطعة ضئيلة من صخرة مشعة 194 عدة في الدقيقة . إذا افترضنا أن العداد يستقبل أشعة من نصف عدد النوى المضمحل فقط ، فما هي فاعلية الصخرة ؟

34 عمر النصف للتريتيوم وهو نظير مشع للهيدروجين 12.33 yr . ما هي النسبة المئوية للنوى الذي يتفتت في عينة من التريتيوم في 6 yr ؟

■ 35 لوحظ أن 2 mg من مادة مشعة نقية قد أصبحت 0.25 mg فقط بعد مرور 3 h . ما هو عمر نصف هذه المادة ؟

■ 36 ما هو كسر المادة المشعة الذي يضمحل في 90 yr إذا كان عمر نصف المادة 156 yr ؟

■ 37 أوضحت القياسات أن 14% فقط من مادة مشعة هو الذي يتبقى بعد مرور 24.0 h . ما هو عمر نصف هذه المادة ؟

■ 38 يعتبر عنصر الإسترونشيوم 90 من نواتج الانشطار المشعة في المفاعلات والقنابل النووية . وحيث أن عمر النصف له طويل جدًا (نحو 28 yr أو 8.8×10^8 s) ، فإنه من الملوثات التي تدوم وتمثل مشكلة خطيرة عند التخلص منها . ما هو كسر الإسترنشيوم الأصلي ، الذي يتبقى بعد مرور مائة عام على انفجار قنبلة نووية ؟

■■ 39 عمر النصف لليورانيوم ^{238}U هو 4.5×10^9 yr . احسب فاعلية 0.1 g من عينة من اليورانيوم النقي .

الأقسام من 28-7 إلى 28-9

40 ما هي النوى التي يرمز لها بالرمز X في الاضمحلالات المشعة التالية :

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow X + ^4_2He \quad , \quad ^{95}_{36}Kr \rightarrow X + ^{0}_{-1}e \quad , \quad ^{59}_{26}Fe \rightarrow X + \gamma$$

41 أكمل معادلات الاضمحلال الإشعاعي التالية وذلك بتحديد العنصر X :

$$^{233}_{91}Pa \rightarrow X + ^{0}_{-1}e \quad , \quad ^{234}_{90}Th \rightarrow ^{230}_{88}Ra + X \quad , \quad X \rightarrow ^{140}_{58}Ce + ^4_2He$$

42 ما هو النظير الذي ينتج بعد أن يضمحل النظير $^{210}_{84}Po$ وذلك بإطلاق جسيم α طاقته 5.3 MeV وشعاع γ طاقته 0.80 MeV ؟

43 حدد النظير الناتج عندما يضمحل $^{209}_{82}Pb$ بإطلاق جسيم β . وكرر بالنسبة للنظير $^{223}_{86}Rn$ الذي يطلق هو الآخر جسيم β .

44 ما هو النظير الناتج عندما يضمحل $^{211}_{83}Bi$ بانبعاث جسيم α طاقته 6.62 MeV ؟

45 يشع $^{220}_{86}Rn$ شعاع γ طاقته 0.54 MeV . ما هي النسبة المئوية التي تتغير بها الكتلة النووية في هذه العملية ؟

46 ما هو التغير النسبي في الكتلة النووية للنظير $^{226}_{90}Th$ عندما يطلق شعاع جاما طاقته 1.11 MeV ؟

■ 47 ما هو النظير الذي ينتج من اضمحلال $^{234}_{92}U$ الذي يطلق جسيم α ؟ والطاقة التي تتحرر في هذا الاضمحلال هي 4.773 MeV . احسب كتلة النويدة الوليدة .

48 ما هو الجسيم الذي ينطلق عندما يضمحل $^{14}_{6}C$ إلى $^{14}_{7}N$ ؟

■ 49 يضمحل اليورانيوم 238 بإطلاق جسيم α بعمر نصف مقداره 4.5×10^9 yr طبقًا للمعادلة : $^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He +$ طاقة فإذا أصبحت الطاقة كلها طاقة حركة لجسيم α ، فما مقدار طاقتها بوحدات MeV ؟ إن طاقتها الفعلية هي 4.19 MeV . فكيف تفسر هذا التناقض ؟ اعتبر أن كتل النظائر المشتركة في التفاعل هي $M(^{238}_{92}U) = 238.05077$ u ، $M(^{234}_{90}Th) = 234.04358$ u و $M(^4_2He) = 4.00260$ u .

■ 50 أي هذه الاضمحلالات التالية يحدث تلقائيًا (طبق اعتبارات الطاقة) ؟

$$^{11}_{5}B \rightarrow ^7_3Li + ^4_2He \quad , \quad ^{144}_{60}Nd \rightarrow ^{140}_{58}Ce + ^4_2He$$

■ 51 افترض أن لديك التفاعل التالى : $^{1}_{1}H + ^{13}_{6}C \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n$ حيث n هو النيوترون . هل يمكن بدء هذا التفاعل بواسطة بروتون ، طاقة حركته 2.2 MeV ؟ اعتبر الكتل الذرية للنوى المشترك في الفاعل كالآتي : $M(^{1}_{1}H) = 1.007825\ u$ ، $M(^{7}_{3}Li) = 7.01600\ u$ ، $M(^{7}_{4}Be) = 7.01693\ u$ ، $M(^{1}_{0}n) = 1.008665\ u$.

■ 52 استنادًا إلى اعتبارات الطاقة ، هل التفاعلات التالية ممكنة ، مع العلم بأن طاقة حركة البروتون الساقط 1.6 MeV ؟ $^{1}_{1}H + ^{7}_{3}Li \rightarrow ^{7}_{4}Be + ^{1}_{0}n$ واعتبر الكتل الذرية للنوى المشترك في التفاعل كالتالي : $M(^{1}_{1}H) = 1.007825\ u$ $M(^{1}_{0}n) = 1.008445\ u$ ، $M(^{7}_{3}Li) = 7.01600\ u$ ، $M(^{7}_{4}Be) = 7.01693\ u$.

■ 53 هب أن لديك التفاعل التالي : $^{4}_{2}He + ^{27}_{13}Al \rightarrow ^{7}_{4}Be + ^{1}_{0}n$ وكانت الكتل الذرية للنوى المشترك في التفاعل كالتالي : $M(^{4}_{2}He) = 4.00260\ u$ ، $M(^{1}_{0}n) = 1.008665\ u$ ، $M(^{271}_{13}Al) = 26.98154\ u$ ، $M(^{30}_{15}P) = 29.97831\ u$
فهل هذا التفاعل ممكن ، علمًا بأن طاقة حركة $^{4}_{2}He$ هي 2.0 MeV ؟

■ 54 يضمحل نظير البولونيوم 210 بإطلاق شعاع جاما طاقته 0.080 MeV ، ومعه جسيم الفا ، طاقة حركته 5.3 MeV من خلال التفاعل : $^{210}_{84}Po \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{206}_{83}Pb + \gamma$ وكانت كتل النوى الناتج هي : $M(^{4}_{2}He) = 4.00260\ u$ ، $M(^{206}_{82}Pb) = 205.97447\ u$. (أ) فإذا علمت أن قيمة طاقة حركة جسيم α هي 5.3 MeV ، فما هي طاقة الارتداد لذرة الرصاص بالتقريب ؟ (ب) احسب الكتلة الذرية المتوقعة للبولونيوم 210 علمًا بأن الكتلة المقاسة هي 209.9829 u .

■■ 55 هب أن 1 kg من الديوتيريوم (الهيدروجين الثقيل $^{2}_{1}H$) قد اندمج ليكون 1 kg من الهليوم طبقًا للتفاعل الآتي : $^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He$ والكتل الذرية $M(^{2}_{1}H) = 2.0141\ u$ ، $M(^{4}_{2}He) = 4.00260\ u$. (أ) ما مقدار الطاقة المتحررة بالجول J ؟ (ب) إذا كان الهليوم المحصور ذا حرارة نوعية 0.75 cal/g.°C . فما مقدار ارتفاع درجة حرارته عند إضافة هذه الطاقة إليه ؟

■ 56 تبدأ سلسلة الثوريوم الواردة في الجدول 1-28 بالعنصر $^{232}_{90}Th$ وتطلق على التوالي ، جسيم α واحد ، جسيمًا β واحد . تحقق من أن النظير الناتج في النهاية هو نفس ما ورد في الجدول .

■ 57 يمر اليورانيوم 238 الذي يقع في سلسلة اليورانيوم الواردة في الجدول 1-28 ، بخمس عمليات اضمحلال α . تحقق من النواة الوليدة الناتجة عقب كل عملية اضمحلال .

■ 58 تبدأ سلسلة الأكتينيوم الواردة في الجدول 1-28 بالنواة $^{235}_{92}U$ وتطلق على تتابع جسيم α واحد ثم جسيم β واحد ، ثم جسيمًا α ، فواحد β ، فثلاثة γ ، فاثنان β ، وجسيم α واحد . ارسم شكلاً بيانيًا لهذه السلسلة وحدد النوى الوليد عقب كل عملية اضمحلال .

الأقسام من 10-28 إلى 15-28

■ 59 يستخدم نظير اليود 131 في علاج اضطرابات الغدة الدرقية لأنه يتركز عند ابتلاعه في الغدة الدرقية . وعمر النصف لهذا النظير 8.1 d . (أ) ما هي فاعلية 0.80 μg من ^{131}I ؟ (ب) ما هي كمية ^{131}I التي لها فاعلية مقدارها 0.2 μCi ؟

■ 60 عمر النصف لنظير الفوسفور 32 هو 14.3 d ويستخدم طبيًا لأنه يتركز في العظام . ما هي فاعلية 0.7 g من ^{32}P ؟

■ 61 كم جرامًا من الحديد 59 في عينة فاعليتها 1 mCi ؟ علمًا بأن عمر النصف له 46.3 d .

■ 62 يشتري أحد المعامل الطبية عينة من نظير مشع فاعليتها 260 mCi ، وعمر النصف لذلك النظير 180 d . ما المدة التي يمكن للمعمل استخدام هذه العينة فيها قبل أن تهبط فاعليتها إلى 26 mCi ؟

■ 63 عمر نصف النظير تريتيوم $({}^{3}_{1}H)$ هو 4600 d . كم جرامًا من التريتيوم تحتوى عليها عينة فاعليتها 2.31 mCi ؟

■ 64 ما مقدار الارتفاع فى درجة حرارة الماء إذا زود ذلك الماء بجرعة إشعاع مقدارها 10.0 mGy ؟

■ 65 ما مقدار جرعة الإشعاع التى يجب أن تستقر فى الرصاص لكى ترفع درجة حرارته 8°C ؟ وحرارة الرصاص النوعية هى 0.031 cal/g.°C .

■ 66 يتعرض عامل وزنه 70 kg فى معمل نووى إلى جرعة إشعاعية مقدارها 0.25 Gy . ما مقدار الطاقة بوحدات جول (J) التى تستقر فى جسد العامل ؟

■ 67 فى محاولة لتأريخ قطعة من العظام ، وجد أن معدل العد من ^{14}C هو 0.048 فقط من العد الناتج من عينة حديثة من العظام . ما هو عمر قطعة العظام ؟ عمر النصف للنظير ^{14}C هو 5700 yr .

■ 68 عمر النصف للثوريوم 232 هو 1.39×10^{10} yr ويضمحل خلال عدد من الخطوات إلى ^{208}Pb . وكانت نسبة ^{208}Pb إلى ^{232}Th فى عينة من الصخور هى 0.17 . ما هو عمر الصخرة منذ أن تجمدت ؟

■ 69 التريتيوم هو $({}^{3}_{1}H)$ أحد نظائر الهيدروجين وعمر النصف له 12.3 yr . ويتكون هذا النظير فى طبقات الجو العليا بواسطة الأشعة الكونية ويختلط جيدًا مع هيدروجين الهواء . ولكى نعين عمر زجاجة من النبيذ وجدت فى كهف قديم تم قياس التريتيوم فى النبيذ ووجد أنه يمثل 6.9% من التريتيوم الموجود فى عينة حديثة من النبيذ . ما هو عمر النبيذ الذى فى الزجاجة ؟

الأقسام من 28-16 إلى 28-18

■ 70 هب أن لديك التفاعل الانشطارى الآتى : ${}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr$ احسب مقدار الطاقة المنطلقة فى هذا التفاعل . الكتل الذرية للنوى المشترك فى هذا التفاعل هى : $M({}^{235}U) = 235.04392$ u ، $M({}^{1}_{0}n) = 1.008665$ u ، $M({}^{144}Ba) = 143.92285$ u ، $M({}^{92}Kr) = 91.92627$ u .

■ 71 (أ) إذا كانت عملية انشطار اليورانيوم ^{235}U مصحوبة بطاقة مقدارها 210 MeV ، فكم من الطاقة ينطلق عند انشطار 1 g من ^{235}U ؟ (ب) إذا كانت تكلفة الكيلووات ساعة من الطاقة 8 cents فما هى تكلفة الطاقة المحسوبة فى (أ) ؟

■ 72 كم جرامًا تلزم من ^{235}U لتشغيل محطة قوى قدرتها 1500 MW لفترة ساعة واحدة إذا كانت الكفاءة الإجمالية للمفاعل 30% ؟ **تلميح** : اعتبر أن كل عملية انشطار يصحبها 210 MeV من الطاقة تقريبًا .

■ 73 ينتج قلب المفاعل فى محطة قوى نووية نموذجية 3600 MW من القدرة الحرارية . فإذا كان ^{235}U فى قلب المفاعل ينخفض بمقدار 28% فى 6 yr فكم كانت كمية ^{235}U الموجودة فى القلب فى البداية ؟ اعتبر أن 210 MeV تقريبًا من الطاقة تنطلق مع كل عملية انشطار .

■■ 74 يصطدم نيوترون سرعته 4×10^{6} m/s بذرة ديوتيريوم ساكنة $({}^{2}_{1}H)$ اصطدامًا مباشرًا مرنًا . (أ) ما هى سرعة النيوترون بعد التصادم ؟ (ب) أعد المسألة إذا حلت ذرة أكسجين ${}^{16}_{8}O$ محل ذرة الديوتيريوم . لاحظ أن النوى الذى كتلته صغيرة يكون أكثر فاعلية فى إبطاء النيوترونات.

■■ 75 يكون إبطاء النيوترونات أكثر ما يمكن فاعلية عند التصادم مع جسيمات لها نفس الكتلة . افترض أن نيوترونًا سرعته 10^{7} m/s يصطدم اصطدامًا مباشرًا مع بروتون حر ساكن . ما هى السرعة النهائية للنيوترون ؟ أعد المسألة إذا كان النيوترون سيصطدم اصطدامًا مرنًا مع ذرة ذهب حرة ساكنة .

76 من التفاعلات الممكنة التي يمكن أن يعمل على أساسها مفاعل الاندماجي : $^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$ حيث $^{3}_{1}H$ هو التريتيوم . كم جرامًا من الديوتيريوم والتريتيوم ستندمج كل ثانية لإنتاج قدرة تصل إلى 1000 MW ؟ مع العلم بأن الكتل الموثوق بها هي $M(^2H) = 2.014102\ u$ ، $M(^3H) = 3.016050\ u$ ، $M(^4He) = 4.0026044\ u$.

77 أوجد الطاقة المتحررة في التفاعلات الاندماجية التالية :

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{1}_{1}H \quad ، \quad ^{2}_{1}H + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{1}H$$

مسائل عامة

78 عمر النصف لنظير الكوبالت ^{60}Co هو 5.3 yr (أ) ما عدد الذرات الموجودة في 1 gm من عينة من ^{60}Co ؟ ما هو ثابت اضمحلال هذه المادة ؟ (جـ) كم عدد عمليات الاضمحلال التي تحدث كل ثانية في 1 g من المادة ؟

79 عينة ما تحتوى على N_1 نواة من مادة عمر النصف لها هو $(T_{1/2})$ و N_2 نواة من مادة أخرى عمر النصف لها $(T_{1/2})_2$. ما هو عمر النصف الفعال للعينة بدلالة $(T_{1/2})_2$ ، $(T_{1/2})_1$ ، N_1 ، N_2 ؟ اعتبر أن عمرى النصف أطول بكثير من زمن المشاهدة .

80 ذكرنا في القسم 16-28 أن إحدى العمليات الممكنة لانشطار النواة المركبة ^{236}U هي

$$^{236}U \rightarrow ^{140}_{56}Ba + ^{92}_{26}Kr + 4^{1}_{0}n + \text{طاقة}$$

ثم تضمحل النظائر الناتجة على امتداد عدة خطوات بإطلاق جسيمات β . ويمكن كتابة هذه العمليات كما يلي :

$$^{140}_{56}Ba \rightarrow ^{140}_{58}Ce + 2\beta + \text{طاقة} \quad ، \quad ^{92}_{36}Kr \rightarrow ^{92}_{40}Zr + 4\beta + \text{طاقة}$$

أوجد الطاقة الإجمالية المتحررة عند انشطار نواة ^{235}U بهذه الطريقة . الكتل الذرية للنوى المشترك في هذه العملية هي : $N(^{235}U) = 235.04392\ u$ ، $M(^{140}Ce) = 139.90539\ u$ ، $M(^{92}Zr) = 91.90503\ u$.